

ХОЛОДНО-
КАТАНЫЕ
ЭЛЕКТРО-
ТЕХНИЧЕСКИЕ
СТАЛИ

СПРАВОЧНИК

ХОЛОДНО- КАТАНЫЕ ЭЛЕКТРО- ТЕХНИЧЕСКИЕ СТАЛИ

СПРАВОЧНИК

Под редакцией
докт. техн. наук Б.В.МОЛОТИЛОВА

*Согласовано с Государственной службой
стандартных справочных данных*



МОСКВА "МЕТАЛЛУРГИЯ" 1989

Авторы Б. В. Молотиллов, Л. В. Миронов, А. Г. Петренко, Л. П. Бабичев, В. П. Барятинский, В. Г. Борисенко, В. С. Вашпанов, В. В. Голубков, К. В. Иванов, Л. Б. Казаджан, Ж. Е. Линецкая, Б. Б. Минц, Б. М. Овсянников, Г. В. Парфенов, А. М. Поживанов, Ф. А. Радин, Н. П. Сакир, В. И. Сидоркин, М. Б. Цырлин, В. К. Чистяков, И. В. Франценюк, В. Ф. Ярошенко.

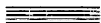
Рецензент докт техн наук, проф Б Г Лившиц

УДК 669.14.018.583 (083)

Холоднокатаные электротехнические стали: Справ изд. Молотиллов Б В, Миронов Л В, Петренко А Г и др М: Металлургия, 1989 168 с

Систематизированы магнитные, электрические и механические свойства различных марок электротехнической холоднокатаной анизотропной и изотропной тонколистовой стали. Представлены графически типичные характеристики магнитных свойств в постоянном и переменном магнитных (частотой 50 Гц) полях. Приведены сведения о покрытиях холоднокатаных электротехнических сталей.

Для инженерно-технических работников и специалистов металлургической, электротехнической, радиоэлектронной, приборостроительной и других отраслей промышленности. Ил 155. Табл 10.



ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	4
Введение	5
I. Анизотропные холоднокатаные электротехнические стали	7
1. Классификация и область применения	7
2. Магнитные свойства	7
2.1. Гарантируемые магнитные свойства	7
2.2. Коэффициент старения	8
2.3. Типичные магнитные свойства	8
3. Покрытия	8
3.1. Классификация, назначение, основные свойства	8
3.2. Характеристика типов покрытий	9
3.3. Контроль качества покрытий	9
4. Механические и физические свойства	9
5. Рекомендации по применению анизотропной ЭТС	11
II. Изотропные холоднокатаные электротехнические стали	12
1. Классификация и область применения	12
2. Гарантируемые и типичные характеристики	13
2.1. Магнитные свойства	13
2.2. Сортамент и геометрия	14
2.3. Механические свойства	14
2.4. Электроизоляционные покрытия	14
3. Рекомендации по применению изотропной ЭТС	15
4. Характеристики магнитных свойств	15
III. Графические зависимости магнитных свойств	16

Интенсификация развития народного хозяйства страны должна сопровождаться ускорением развития электроэнергетики и прогрессом в производстве электротехнического оборудования. В решениях XXVII съезда КПСС указано на необходимость снизить в двенадцатой пятилетке удельную металлоемкость машин и оборудования на 12—18% и их удельную энергоемкость на 7—12%. Это, в свою очередь, диктует необходимость дальнейшего совершенствования существующих и непрерывной разработки новых материалов, в частности, электротехнических сталей.

Электротехнические стали — один из основных материалов в электротехнике. Технический уровень электротехнического оборудования, в котором используется электротехническая сталь, определяется качественным уровнем этой стали и конструкцией магнитопроводов.

В начале 70-х годов на металлургических заводах СССР было освоено крупномасштабное производство холоднокатаных тонколистовых электротехнических сталей — анизотропных (трансформаторных) и изотропных (динамных).

Освоение производства холоднокатаных сталей резко улучшило условия труда рабочих на металлургических заводах, значительно повысило производительность труда и явилось новым этапом на пути повышения качества и технических характеристик электротехнических сталей.

Качество холоднокатаных электротехнических сталей систематически повышается. Улучшаются магнитные свойства анизотропных и изотропных сталей благодаря совершенствованию существующих технологических режимов

и созданию новых процессов. Государственные стандарты на электротехнические стали пересматриваются каждые пять лет, и каждый раз повышается уровень гарантируемых магнитных свойств, возрастают требования к другим показателям качества выпускаемых сталей.

Вместе с тем потребители электротехнических сталей недостаточно информированы о свойствах холоднокатаных сталей различных марок.

Технические условия и стандарты содержат краткие сведения о качественных показателях той или иной марки стали. Часто конструкторам электротехнического оборудования необходимо иметь больше информативного материала для правильного выбора марки стали.

В последние годы опубликовано несколько обзорных статей и монографий о характеристиках электротехнических сталей, в том числе работа Л. Ш. Казарновского «Листовая электротехническая сталь» в сборнике «Итоги науки и техники» (серия «Электротехника и энергетика») за 1969 г.; работа В. В. Дружинина «Магнитные свойства электротехнической стали» (М.: Энергия, 1974); справочник «Прецизионные сплавы» под редакцией Б. В. Молотилова (М.: Металлургия, 1983).

Настоящий справочник, по мнению его авторов, поможет потребителям электротехнических сталей составить более полное представление о свойствах и качестве сталей и послужит дальнейшему повышению технико-экономических показателей электротехнического оборудования, снижению расхода металла и уменьшению энергозатрат в народном хозяйстве.

Условные обозначения

B	— магнитная индукция, Тл,
$B_{\max}$	— амплитуда синусоидальной магнитной индукции, максимальное значение индукции статической петли гистерезиса, Тл;
ΔB	— анизотропия магнитной индукции, Тл,
$P_{\text{уд}}$	— удельные магнитные потери, Вт/кг,
H	— напряженность постоянного магнитного поля, А/м,
$H_{\max}$	— амплитуда напряженности магнитного поля, А/м,
H_d	— эффективное значение напряженности магнитного поля, А/м,
$K_{\text{ст}}$	— коэффициент старения по удельным магнитным потерям, %,
σ_a	— временное сопротивление, Н/мм ² ,
$\sigma_{0.2}$	— условный предел текучести, Н/мм ² ,
$\delta_{\text{д}}$, δ_{25}	— относительное удлинение, %,
$HV5$	— твердость по Виккерсу

Электротехнические стали (ЭТС) — это специальный класс магнитно-мягких ферромагнитных материалов, которые используются для изготовления магнитопроводов и магнитоактивных частей разнообразных электротехнических устройств. Свойства ЭТС в значительной степени определяют характеристики, экономичность, габариты устройств и возможность их совершенствования, поэтому улучшению технологии производства и повышению характеристик ЭТС, особенно магнитных свойств, во всем мире уделяется большое внимание.

Современные ЭТС — это сплавы технического железа с кремнием и иногда алюминием.

В обычной холоднокатаной ЭТС содержание кремния не превышает 3,5% и алюминия 0,5%. Сплавы такого состава имеют кубическую решетку, где направлением легкого намагничивания является ребро куба. В других направлениях намагничивание требует больших затрат энергии.

Различными технологическими приемами может быть достигнуто такое текстурное состояние в готовой полосе стали, когда ребро куба [001] (направление легкого намагничивания) совпадает с направлением холодной прокатки, а плоскость (110) совпадает с плоскостью прокатки. Тогда в направлении, перпендикулярном направлению прокатки, располагается диагональ грани куба [110] — направление более трудного намагничивания. В этом случае магнитные свойства будут иметь ярко выраженную анизотропию (холоднокатаная анизотропная сталь). Чем выше степень анизотропии, тем более высокими магнитными свойствами обладает сталь вдоль направления холодной прокатки.

Созданная к настоящему времени технологическая схема производства качественной анизотропной стали включает следующие основные операции:

- выплавку в конвертерах или электропечах с последующей внепечной обработкой жидкой стали:

- непрерывную разливку в слэбы или отливку слитков с последующей прокаткой на слэбы,

- нагрев слэбов и горячую прокатку на полосы толщиной 2,0—3,0 мм,

- нормализацию горячекатаных полос,

- травление горячекатаных полос и холодную прокатку на толщину 0,35—0,27 мм (в том числе с промежуточным рекристаллизационным отжигом при толщине 0,80—0,70 мм),

- обезуглероживающий отжиг полос толщиной 0,35—0,27 мм (иногда обезуглероживающий отжиг совмещают с рекристаллиза-

ционным отжигом полос толщиной 0,80—0,70 мм);

- нанесение термостойкого покрытия и высокотемпературный отжиг металла в рулонах;

- выправляющий отжиг полосы с нанесением электроизоляционного покрытия.

Различными технологическими приемами может быть достигнуто и такое структурное состояние в готовой полосе стали, при котором она будет изотропной — свойства ее во всех направлениях будут одинаковыми. В действительности полной изотропности достигнуть, как правило, не удается, и устанавливается некоторая допускаемая величина анизотропии свойств обычно для разности удельных потерь или магнитной индукции в продольном и поперечном направлениях. Такая сталь применяется в магнитопроводах разнообразных электродвигателей, генераторов, преобразователей, реле и других изделиях, где магнитный поток либо вращается, либо охватывает все направления в плоскости листа.

В производстве изотропных электротехнических сталей применяют две разновидности технологического процесса, отличающиеся количеством операций холодной прокатки — это, так называемые, одностадийный и двухстадийный процессы.

В обоих процессах выплавка, разливка, горячая прокатка и обработка горячекатаной полосы аналогичны и имеют своей целью обеспечить выплавку и обработку металла с минимальным количеством вредных примесей (серы, азота, кислорода, углерода) и их дисперсных выделений в виде неметаллических включений и карбидов.

Холодная прокатка при двухстадийном процессе ведется в две операции: первая — с обжатием 70—80%, вторая — 5—25%. Промежуточный отжиг проводится в промежуточных печах при 850—950° С с выдержкой продолжительностью 2,5—3,5 мин в обезуглероживающей азото-водородной атмосфере.

Заключительный отжиг проводят при 900—1050° С.

При одностадийном процессе холоднокатаная полоса конечной толщины подвергается совмещенному обезуглероживающе-рекристаллизационному отжигу также в проходной печи сначала при 850—900° С (2,5—3,0 мин) в обезуглероживающей атмосфере, затем при 950—1050° С (1,5—2,0 мин) в защитной среде. В обоих процессах после отжига на полосу наносят электроизоляционное покрытие различных (в зависимости от назначения) состава и свойств: неорганические износостойкие, полупроводниковые или органические. Покрытия по-

следних двух типов повышают стойкость штампового инструмента.

Преобладающая часть (более 95%) листовых ЭТС используется в магнитопроводах электрических машин и аппаратов, работающих в переменных магнитных полях промышленной частоты тока и напряженности поля порядка до 10^3 А/м и более. Это трансформаторы самых разнообразных типов и назначений, электрические генераторы, все виды электродвигателей — от самых мощных промышленных до очень маленьких бытовых и приборных.

Быше были названы два основных вида холоднокатаных ЭТС: анизотропная сталь и изотропная сталь. Основное различие между ними в особенностях магнитных свойств анизотропная ЭТС имеет высокие магнитные свойства (высокую магнитную индукцию и низкие удельные магнитные потери) в одном направлении — вдоль направления прокатки, в направлении поперек прокатки магнитные свойства невысоки; изотропная ЭТС имеет примерно одинаковые магнитные свойства во всех направлениях.

Это различие в свойствах анизотропной и изотропной ЭТС определяет и различие в их применении и должно правильно учитываться при конструировании магнитопроводов.

В действующих стандартах на холоднокатаные анизотропные (ГОСТ 21427 1—83) и изотропные (ГОСТ 21427 2—83) стали нормируются удельные магнитные потери при частоте тока 50 Гц и магнитной индукции $B = 1,0; 1,5$ и $1,7$ Тл ($P_{1,0/50}$, $P_{1,5/50}$ и $P_{1,7/50}$ Вт/кг соответственно (последняя характеристика только для анизотропной стали) и по величине магнитной индукции при напряженности магнитного поля $H = 100; 1000, 2500$ А/м B_{100} , B_{1000} , B_{2500} Тл соответственно (первая характеристика только для анизотропной стали). Для изотропной стали гарантируется однородность магнитных свойств в плоскости листа — установлена максимальная допустимая разность магнитной индукции B_{2500} Тл при измерении в продольном и поперечном направлениях.

Кроме магнитных свойств, действующими стандартами нормируется еще ряд важных характеристик качества ЭТС: механические свой-

ства, характеристики электроизоляционных покрытий, коэффициенты старения и заполнения, размерные параметры (допуски на толщину и ширину, разнотолщинность, состояние поверхности).

Стандарт регламентирует гарантированный, минимально допустимый предел свойств стали, определяющий ее марку при аттестации у поставщика и приемке у потребителя. При отработанной технологии производства и правильно установленных требованиях действительные свойства металла всегда лучше гарантированного уровня и могут быть охарактеризованы так называемым типичным уровнем. Типичный уровень свойств — это наиболее часто встречающиеся фактические оценки при контроле металла данной группы за продолжительный период (квартал, год). Эти цифры отражают истинное качество металла и их рекомендуется принимать в расчетах при конструировании электротехнических устройств, характеристики которых допускают колебания свойств используемых материалов от среднего уровня. И только при требовании максимальной надежности в значениях расчетных параметров следует брать гарантируемый уровень свойств.

Магнитопроводы электротехнических устройств часто имеют сложную форму; направление магнитного потока и величина магнитной индукции в различных их частях изменяются. Даже при простом магнитопроводе магнитный поток не бывает постоянным и изменяется в зависимости от режима работы. Поэтому при электромагнитных расчетах конструктору совершенно недостаточно иметь только регламентированный стандартами ограниченный набор магнитных характеристик ЭТС. Возникает необходимость иметь, во-первых, типичные значения свойств и характеристик поставляемой стали разных марок и, во-вторых, основные характеристики магнитных свойств при изменении напряженности поля и индукции в широком диапазоне значений.

С этой целью в настоящей справочнике приведены перечисленные необходимые данные по всем освоенным на металлургических заводах в массовом производстве маркам анизотропной и изотропной стали.

1. Классификация и область применения

Химический состав холоднокатаной анизотропной стали не нормируется. Однако с тем, чтобы обеспечить в конечной продукции заданный уровень магнитных свойств, сталь выплавляется с содержанием кремния в пределах 2,8—3,2% (в стали марки 3311 содержание кремния снижено).

В соответствии с ГОСТ 21427 1—83 сталь изготавливают марок: 3311 (3411); 3411; 3412; 3413; 3414; 3415; 3404; 3405; 3406; 3407; 3408; 3471 и 3472.

По видам продукции сталь подразделяется на: лист, рулонную сталь и ленту резаную (ленту).

Ниже приведены некоторые характерные параметры геометрических размеров стали.

Размеры листов по длине и ширине:

Толщина, мм	Длина листов при ширине, мм					
	650	700	750	800	860	1000
0,27	1500	1500	1500	1500	1500	—
0,30	1500	1500	1500	1500	1500	2000
0,35	1500	1500	1500	1500	1500	2000
0,50	1500	1500	1500	1500	1500	2000
0,80	—	—	1500	—	—	—

Рулонную сталь изготавливают толщиной 0,27; 0,30; 0,35; 0,50; 0,80 мм и шириной 650; 700; 750; 800; 860 и 1000 мм.

Резаную ленту изготавливают толщиной 0,27; 0,30; 0,35 и 0,50 мм и шириной 170; 180; 190; 200; 240; 250; 300; 325; 360; 400; 465 и 500 мм.

Предельные отклонения по толщине стали:

Толщина, мм	0,27	0,30	0,35	0,50	0,80
Предельные отклонения при точности прокатки, мм					
нормальной	±0,02		±0,03	+0,03 —0,04	±0,05
повышенной	±0,01		±0,02	+0,02	—0,03

Продольная и поперечная разнотолщинность листов, отрезков рулонной стали и ленты длиной 1500 мм и поперечная разнотолщинность рулонной стали не должна превышать $1/2$ суммы предельных отклонений по толщине.

Неплоскостность стали ограничивается следующими нормами, мм, на 1 м:

Класс 1 Класс 2

Лист	4	8
Рулонная сталь	2	4
Лента	5	10

Неплоскостность стали толщиной 0,80 мм не должна превышать 8 мм.

Марки анизотропной стали по условиям их применения в магнитопроводах можно разделить на следующие группы:

— марка 3311 (3411) толщиной 0,80 мм; типичное применение — сердечники полюсов электромашин постоянного тока;

— марки 3471 и 3472 толщиной 0,50 и 0,35 мм; типичное применение — магнитопроводы измерительных трансформаторов;

— марки 3411, 3412, 3414, 3415 толщиной 0,50—0,27 мм; типичное применение — магнитопроводы с воздушными зазорами (сердечники крупных электромашин, реле и др.), магнитопроводы трансформаторов малой мощности;

— марки 3404, 3405, 3406 толщиной 0,35—0,27 мм; типичное применение — магнитопроводы силовых трансформаторов;

— марки 3407, 3408 толщиной 0,35—0,27 мм; типичное применение — витые магнитопроводы и магнитопроводы сверхмощных и наиболее ответственных трансформаторов.

Сталь низших марок 3411, 3412 толщиной 0,35—0,30 мм, а также сталь марок 3417 и 3472 изготавливается в ограниченном количестве. В основном поставляется сталь марок 3413, 3414, 3404, 3415, 3405, 3406, 3407, 3408. Для этих основных марок и приводятся в справочнике типичные магнитные и механические свойства.

2. Магнитные свойства

Магнитные свойства анизотропных сталей определяются в соответствии с ГОСТ 12119—80 «Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств».

Измерение магнитных свойств в постоянных и в переменных магнитных полях производят, как правило, на образцах в аппарате Эпштейна, так как он наиболее удобен для практического применения и обеспечивает достаточно высокую воспроизводимость результатов измерений.

2.1 Гарантируемые магнитные свойства

В соответствии с ГОСТ 21427.1—83 гарантируемые магнитные свойства стали всех марок, кроме 3406, 3407, 3408, определяют на одном образце.

Гарантируемые магнитные свойства стали высших марок 3406, 3407 и 3408 определяют на двух образцах, отобранных от начала и конца рулона. Марку стали в этом случае устанавливают по образцу, имеющему худшие магнитные свойства.

Гарантированными величинами для основных марок стали в соответствии с ГОСТ 21427.1—83 являются:

— удельные магнитные потери при значениях магнитной индукции 1,0; 1,5 или 1,7 Тл при частоте 50 Гц ($P_{1,0/50}$, $P_{1,5/50}$ или $P_{1,7/50}$, Вт/кг);

— магнитная индукция при значениях напряженности постоянного магнитного поля 100 или 2500 А/м (B_{100} или B_{2500} , Тл).

Гарантированные магнитные свойства основных марок анизотропных ЭТС:

Толщина, мм	Марка стали	Удельные магнитные потери, Вт/кг, не более		Магнитная индукция, Тл, не менее, при напряженности магнитного поля, А/м	
		$P_{1,0/50}$	$P_{1,7/50}$	100	2500
0,80	3311 (3411)	4,0*	—	—	1,75
	3411	2,45	—	—	1,75
	3412	2,10	—	—	1,80
	3413	1,75	—	—	1,85
0,50	3414	1,50	—	—	1,88
	3411	1,75	—	—	1,75
	3412	1,50	—	—	1,80
	3413	1,30	—	—	1,85
0,35	3414	1,10	—	—	1,88
	3415	1,03	—	—	1,90
	3404	—	1,60	1,60	—
	3405	—	1,50	1,61	—
	3406	—	1,43	1,62	—
	3407	—	1,36	1,68	—
	3408	—	1,30	1,71	—
	3413	1,19	—	—	1,85
	3414	1,03	—	—	1,88
	3415	0,97	—	—	1,90
0,30	3404	—	1,50	1,60	—
	3405	—	1,40	1,61	—
	3406	—	1,33	1,62	—
	3407	—	1,26	1,68	—
	3408	—	1,20	1,71	—
0,27	3414	1,03	—	—	1,85
	3405	—	1,38	1,61	—
	3406	—	1,27	1,62	—
	3407	—	1,20	1,68	—
	3408	—	1,14	1,71	—

* $P_{1,0/50}$

2.2 Коэффициент старения

Нагрев магнитопроводов в процессе эксплуатации электротехнических устройств способствует некоторому ухудшению магнитных свойств электротехнической стали. Для контроля возможного ухудшения магнитных свойств вводится так называемый коэффициент старения. Существуют понятия коэффициента старения по удельным магнитным потерям и коэффициента старения по магнитной индукции. Для основных марок стали нормируется коэффициент старения по удельным магнитным потерям (%), который определяется по следующей формуле:

$$K_{ст} = [(P_2 - P_1) / P_1] \cdot 100,$$

где P_1 и P_2 — удельные магнитные потери до и после старения.

В соответствии с ГОСТ 21427.1—83 коэффициент старения по удельным магнитным потерям не должен превышать 4% для стали марок 3311, 3411, 3412, 3413, 3414 и 3415 и 2% для стали марок 3404, 3405, 3406, 3407 и 3408.

2.3 Типичные магнитные свойства

Характеристики с типичным уровнем магнитных свойств основных марок анизотропных ЭТС производства Новолипецкого металлургического комбината и Верх-Исетского металлургического завода представлены графически в виде следующих кривых:

1) кривые намагничивания в постоянном магнитном поле $B = f(H)$;

2) зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля $\mu = f(H)$;

3) зависимость амплитуды магнитной индукции от амплитуды напряженности переменного магнитного поля $B_{max} = f(H_{max})$;

4) зависимость амплитуды магнитной индукции от эффективного значения напряженности переменного магнитного поля $B_{max} = f(H_{eff})$;

5) зависимость удельных магнитных потерь от амплитуды магнитной индукции $P_{уд} = f(B_{max})$;

6) статические петли гистерезиса при величине магнитной индукции 1,0; 1,5 и 1,7 Тл.

Характеристики по пп. 3, 4 и 5 измеряли при частоте перемагничивания (частота переменного тока) 50 Гц.

Характеристики по пп. 1, 3, 4 и 5 измеряли вдоль направления прокатки и под следующими углами к направлению прокатки: 15, 30, 45, 60 и 90° С.

Характеристики по пп. 2 и 6 измеряли вдоль направления прокатки.

3. Покрытия

3.1. Классификация, назначение, основные свойства

Анизотропная электротехническая сталь по-разному используется в зависимости от состояния поверхности:

- с металлической поверхностью;
- без электроизоляционного покрытия (БП);
- с электроизоляционным термостойким покрытием (ЭТ);
- с изоляционным покрытием, не ухудшающим штампуемость (М).

С указанными видами покрытий изготавливают сталь следующих толщин:

Толщина стали, мм	0,27	0,30	0,35	0,50	0,80
Типы покрытия	ЭТ	ЭТ, М	ЭТ, М, БП	БП	Без покрытия

Параметры качества перечисленных выше покрытий и методы их определения регламентированы ГОСТ 21427.1—83

Наиболее широко применяется сталь с электроизоляционным термостойким покрытием типа ЭТ Основное назначение этого покрытия — обеспечение необходимого омического сопротивления между пластинами (витками) магнитопроводов

Толщина покрытия ЭТ не более 5 мкм на сторону, коэффициент сопротивления — не менее $10 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ Покрытие не разрушается и не отслаивается с наружной стороны образца после его изгиба на 90° вокруг стержня диаметром 20 мм

Сталь с покрытием данного типа после механической обработки у потребителей может подвергаться отжигу для восстановления магнитных свойств в виде отдельных пластин, пакетов или готовых магнитопроводов В связи с этим гарантируется сохранность электроизоляционных свойств покрытия после нагрева до 800°C и выдержки 3 ч в нейтральной атмосфере или после нагрева до $820 \pm 10^\circ \text{C}$ и выдержки 3 мин на воздухе

Покрытие ЭТ нейтрально к трансформаторному маслу при температурах до 100°C и маслостойко до 150°C Нейтральность покрытия оценивают по результатам сопоставления параметров двух проб трансформаторного масла массой по 0,3 кг после выдержки в одинаковых условиях при температуре $100 \pm 1^\circ \text{C}$ в течение 1000 ч. одной, содержащей пакет пластин стали размером $280 \times 30 \text{ мм}$ массой 0,5 кг с испытываемым покрытием, другой — без металла

Покрытие считается нейтральным, если тангенс угла диэлектрических потерь, кислотное число и содержание водорастворимых кислот и щелочей для масла, в котором находилась сталь с покрытием, не увеличились более чем на 15% по сравнению с характеристиками состаренного чистого масла

Маслостойкость покрытия характеризуется прочностью сцепления покрытия с металлом при изгибе и величиной коэффициента сопротивления покрытия при испытании образцов размером $280 \times 30 \text{ мм}$ после выдержки пакета массой 0,5 кг в течение 168 ч в сосуде, содержащем 0,4 кг трансформаторного масла (при температуре $150 \pm 2^\circ \text{C}$)

Основное назначение покрытия типа М — сохранение достаточно высокой стойкости штампов при вырубке сложных по форме позиций магнитопроводов

Сталь с состоянием поверхности, характеризуемым ГОСТ 21427.1—83 шифром БП, содержит на поверхности тонкую стеклокерамическую пленку, которая служит обычно грунтовым слоем для наносимых затем электроизоляционных покрытий Требования к физическим

и другим параметрам поверхности типов М и БП определяются по соглашению изготовителя стали с потребителями

3.2. Характеристика типов покрытий

Покрытие типа ЭТ характеризуется относительно высокой твердостью и высокой степенью стекловидности, что облегчает шихтовку пластин при изготовлении магнитопровода Специфическая особенность покрытия данного типа — существенно меньший (примерно в 1,5 — 2,0 раза) коэффициент линейного термического расширения по сравнению с металлом Благодаря этому в металле создаются ориентированные вдоль направления прокатки растягивающие напряжения, которые способствуют уменьшению удельных магнитных потерь, магнитоэстрикции, чувствительности пластин стали к влиянию сжимающих напряжений в магнитопроводе

Покрытие типа М и грунтовый слой на стали, поверхность которой характеризуется шифром БП, не обязательно обладают электроизоляционными свойствами Они отличаются малой толщиной (1—2 мкм или менее) и мало влияют на величину коэффициента заполнения (K) Минимальные допускаемые ГОСТ 21427.1—83 значения K для стали разных толщин с различными типами покрытий следующие.

Тип покрытия	Толщина стали, мм	Коэффициент заполнения не менее	
		группа А	группа Б
БП	0,35	0,97	0,97
	0,50	0,98	0,98
	0,27	0,95	0,94
ЭТ	0,30	0,96	0,95
	0,35	0,97	0,96
М	0,35	0,97	0,96
	0,50	—	0,97

3.3. Контроль качества покрытий

Толщину покрытия, его адгезию к металлу при изгибе стали, коэффициент сопротивления покрытия изготовитель проверяет на каждом отгружаемом рулоне или каждой пачке стали

Величину коэффициента заполнения и сохранность электроизоляционных свойств покрытия после нагрева при неизменной технологии изготовитель стали проверяет периодически на части продукции

Испытания покрытия типа ЭТ на нейтральность к трансформаторному маслу и маслостойкость проводят выборочно на отдельных партиях металла при изменении основного состава или технологии получения покрытия

4. Механические и физические свойства

В соответствии с ГОСТ 21427.1—83 единственной нормируемой характеристикой механиче-

ских свойств анизотропной ЭТС является число перегибов до появления первой трещины или разрушения образца

Вышеуказанным стандартом регламентируется отбор проб, изготовление образцов и методика проведения испытаний.

В качестве проб от начала и конца каждого рулона отрезают по одному отрезку длиной 1500—2000 мм. Для испытания на перегиб из каждого отрезка вырезают вдоль направления прокатки по два образца шириной 20—40 мм без видимых заусенцев. Образцы подвергают испытаниям без дополнительной термообработки. Один образец вырезают на расстоянии 30—90 мм от кромки, другой — из середины отрезка. При возникновении разногласий испытания проводят на образцах шириной 30 мм.

Испытания проводят в тисках с радиусом закругления 5 мм при температуре 15—35°С. При испытании должно быть обеспечено постоянное прилегание образца к поверхности губок тисков.

Одним целым числом перегибов считается перегиб образца от начального положения на 90° и обратное его выпрямление до начального положения. Половиной числа перегибов считается загиб образца на 90° без выпрямления.

Разрушением образца считается появление трещины любой длины, видимой визуально, или полное разрушение образца. Полученное значение числа перегибов округляется до ближайшего целого или полуцелого числа. За результаты испытания принимают среднее арифметическое число перегибов по данным испытания четырех образцов.

Ниже приведены нормы на число перегибов анизотропной ЭТС при доверительной вероятности 0,97.

Толщина, мм	0,27, 0,30	0,35	0,50	0,80
Число перегибов, не менее				
для каждого образца	1	1	0,5	1
для испытанных образцов (среднеарифметическое)	4	3	2	—

Примечание. По отдельным техническим условиям ленту толщиной 0,35 мм и менее для витых сердечников изготавливают с гарантированным числом перегибов для каждого образца не менее двух.

Число перегибов, выдерживаемое анизотропной ЭТС, определяется в основном толщиной полосы (чем тоньше полоса, тем больше число перегибов она выдерживает), кристаллографической структурой стали, а также количеством и условиями выделений включений типа карбидов и оксидов.

В настоящее время фактическое число перегибов, которое выдерживают образцы анизотропной ЭТС, как правило, превышает гарантированное.

В тесной связи с практической потребностью все большее значение приобретают характе-

ристики механических свойств анизотропной ЭТС, полученные по результатам испытаний на растяжение и измерение твердости.

Типичные интервалы значений предела текучести, временного сопротивления, относительного удлинения и твердости по Виккерсу (не нормируемые ГОСТ 21427-1—83) анизотропной ЭТС, полученные на основании обработки значительного массива экспериментальных данных, приведены ниже.

$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	295—345*
	345—390
	275—325
$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	295—345
	9—15
δ_{25} , %	30—50
НВ5	145—175

*Числитель — вдоль прокатки
знамена — поперек прокатки

Испытания на растяжение проводили в соответствии с ГОСТ 11701—84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент» на образцах шириной $b_0 = 30$ мм с начальной расчетной длиной $l_0 = 25\sqrt{F_0}$. Установление указанной ширины образца обусловлено крупнозернистостью исследованной стали. При меньшей ширине не исключались случаи наличия в отдельных зонах рабочей части образца одного зерна по всей ширине последнего.

Проведенные предварительные испытания показали, что значения относительного удлинения образцов с начальной расчетной длиной $l_0 = 25\sqrt{F_0}$ и $l_0 = 4b_0$ (основного образца по ГОСТ 11701—84) совпадали.

Полоса рассеяния полученных характеристик механических свойств (от средних значений) составляла $\pm 2\%$.

Измерение твердости проводили алмазной пирамидой по методу Виккерса при нагрузке 49,03 Н в соответствии с ГОСТ 2999—75.

Следов деформации на обратной стороне образцов при визуальном наблюдении не зафиксировано. Для подтверждения достоверности полученных результатов измерений были проведены сравнительные измерения твердости при применении «подложек» с различной твердостью (HRC60 и HRC35). Результаты измерений твердости совпадали.

Влияние покрытия на результаты измерений твердости несущественно.

В переводе на шкалу В Роквелла интервал значений твердости составил HRB79—87.

Представляется также целесообразным привести в данном разделе справочника основные физические свойства анизотропной ЭТС, уровень которых обусловлен химическим составом

Плотность, кг/м³ 7650
Удельное электросопротивление, Ом · м $(4,8 \div 5,2) \times 10^{-7}$

Индукция насыщения, Тл	2,03
Точка Кюри, °С	745
Модуль упругости, Н/мм ²	
вдоль прокатки	$(1,2 \div 1,3) \times 10^6$
поперек прокатки	$(2,0 \div 2,1) \times 10^6$

5. Рекомендации по применению анизотропной ЭТС

Основная область применения анизотропной ЭТС — трансформаторостроение и крупное электромашиностроение

В 1960-х годах холоднокатаная анизотропная ЭТС начала широко применяться вместо горячекатаной изотропной высококремнистой ЭТС в трансформаторах и крупных электрических машинах. В настоящее время производство горячекатаной ЭТС сведено к минимуму.

Трансформаторы и крупные электрические машины были перепроектированы с учетом новых возможностей улучшения технико-экономических показателей, которые давали высокие магнитные свойства холоднокатаной анизотропной ЭТС вдоль направления прокатки.

Переход на холоднокатаную анизотропную ЭТС позволил существенно снизить удельный расход стали на единицу мощности, потери в стали и намагничивающую мощность.

Освоение промышленного производства высококачественной анизотропной ЭТС и широкое внедрение ее на электротехнических заводах дало толчок к появлению новых конструкций магнитопроводов трансформаторов, позволяющих наиболее полно использовать преимущества анизотропной ЭТС. К таким конструкциям относятся в первую очередь шихтованные магнитопроводы с «косым» стыком пластин и витые магнитопроводы. В этих конструкциях магнитный поток направлен вдоль направления прокатки стали почти во всем объеме магнитопровода, и доля участков, в которых магнитный поток отклоняется от направления прокатки, незначительна.

Технология изготовления магнитопроводов и сердечников из холоднокатаной анизотропной ЭТС также должна учитывать особенности этой стали, и главная особенность при этом — чувствительность магнитных свойств к различного рода механическим напряжениям в стали.

Высокие магнитные свойства вдоль направления прокатки в стали в исходном состоянии могут быть утрачены в процессе изготовления магнитопроводов и сердечников в результате неправильно разработанных технологических операций при механической обработке ЭТС и при механических воздействиях на ЭТС при сборке магнитопроводов и сердечников.

Любая механическая обработка в той или иной степени ухудшает магнитные свойства ЭТС, будь то резка, штамповка, опиловка заусенцев, шлифование, гибка, прессование и

т.д. Поэтому все технологические операции, связанные с холоднокатаной анизотропной ЭТС, надо проводить с особой тщательностью и осторожностью, все технологическое оборудование и оснастка должны иметь высокий технический уровень, ножницы для раскроя стали, вырубные штампы и т.п. должны быть очень высокого качества.

Однако и при высоком техническом уровне механической обработки и сборки магнитопроводов и сердечников рекомендуется проводить отжиг магнитопроводов и сердечников или их элементов (отдельных пластин). Цель отжига — снятие механических напряжений в стали, ухудшающих магнитные свойства.

В некоторых конструкциях магнитопроводов и сердечников отжиг просто необходим, например отжиг витых магнитопроводов, в которых малый радиус навивки и большое натяжение ленты приводят к сильному ухудшению магнитных свойств, восстановить которые должен отжиг.

Оптимальный режим отжига следует подбирать в каждом конкретном случае. Отжиг отдельных пластин или штампованных деталей можно производить так же, как и отжиг полос для образцов по ГОСТ 21427-1-83.

Следует, однако, отметить, что даже в самых совершенных на сегодняшний день конструкциях магнитопровода и при самой совершенной технологии удельные магнитные потери в собранном магнитопроводе из анизотропной ЭТС всегда больше, чем в стандартном образце, изготовленном в соответствии с ГОСТ 21427-1-83.

Такое увеличение удельных магнитных потерь в стали изделия по сравнению с удельными магнитными потерями в стали в состоянии поставки обусловлено и конструктивными и технологическими факторами.

Конструктивные факторы увеличения потерь связаны с тем, что в любом магнитопроводе, сердечнике существуют участки, в которых магнитный поток отклоняется от направления прокатки анизотропной ЭТС. Такие участки существуют даже в шихтованных магнитопроводах с «полным косым» стыком пластин и даже в витых магнитопроводах, хотя доля этих участков в общей массе магнитопровода и сведена к минимуму.

К конструктивным факторам увеличения потерь следует отнести также и увеличение потерь в магнитопроводе, сердечнике из-за наличия высших гармонических в кривой магнитного потока. Увеличение потерь по этой причине происходит, например, в витых пространственных магнитопроводах трехфазных трансформаторов, в зубцах сердечников электрических машин, в магнитопроводах электромагнитных реакторов и т.д.

Технологические факторы увеличения потерь связаны с существованием механических на-

пращений после механической обработки и сборки магнитопроводов и сердечников, которые не всегда удается устранить отжигом в условиях производства на предприятиях потребляющих отраслей.

Для оценки степени увеличения удельных магнитных потерь в стали изделия вводятся при расчетах и исследованиях коэффициент увеличения потерь, равный отношению удельных магнитных потерь в стали изделия к удельным магнитным потерям, измеренным на стандартном образце стали в соответствии с ГОСТ 12119—80

Часто при расчетах магнитных цепей приходится учитывать различное значение величины коэффициента увеличения потерь в различных участках магнитопровода или сердечника. Для точного определения коэффициента увеличения потерь в различных участках должно быть проведено экспериментальное исследование на моделях в каждом конкретном случае для данного изделия

Если значение величины коэффициента увеличения потерь превышает 1,2—1,3, то это говорит о том, что в данном изделии анизотропная ЭТС используется неэффективно, конструкция и технология изготовления магнитопровода «губят» высокие магнитные свойства анизотропной ЭТС.

Чем выше марка анизотропной ЭТС, тем жестче требования к конструкции и технологии изготовления магнитопровода или сердечника с точки зрения оптимального использования высоких магнитных свойств анизотропной ЭТС вдоль направления прокатки. Следует помнить, что чем выше марка стали, тем резче ухудшаются ее магнитные свойства при отклонении направления магнитного потока от направления прокатки и тем легче испортить ее высокие магнитные свойства вдоль направления прокатки при различных механических воздействиях

Поэтому целесообразно, например, использовать анизотропную ЭТС марок 3406, 3407, 3408 в магнитопроводах трансформаторов с «прямым» стыком пластин, в сегментах сердечников крупных электрических машин в случае отклонения оси крайних зубцов от направления прокатки больше, чем на 10° , в сердечни-

ках со штампованными пластинами без отжига и т. п.

Ухудшение магнитных свойств анизотропной ЭТС в изделиях проявляется не только в увеличении удельных магнитных потерь, но и в снижении магнитной индукции при данном значении напряженности магнитного поля (кривая намагничивания идет ниже) и в увеличении магнитоstriction

Таким образом, приведенные в подразделе 2 типичные характеристики магнитных свойств марок анизотропной ЭТС относятся к стандартному образцу по ГОСТ 21427 1—83, т. е. к стали в состоянии поставки, и при расчете магнитных цепей конкретных изделий необходимы поправки, определяемые чаще всего опытным путем. Определение таких поправок — необходимый этап исследовательских работ при проектировании изделий, магнитные цепи которых содержат ЭТС. Только в простейших магнитопроводах типа замкнутого тороида можно получить характеристики магнитных свойств, совпадающие или почти совпадающие с характеристиками, полученными на стандартном образце. В магнитных цепях с воздушными зазорами и с резко переменными сечениями участков магнитопроводов следует вводить дополнительные поправки на размагничивающий фактор. Эти поправки могут быть определены из расчета картины магнитного поля для данного участка магнитной цепи.

В последние годы в мировой практике проектирования электротехнических устройств с использованием анизотропной ЭТС наметилось две тенденции. Первая тенденция — более широкое применение анизотропной ЭТС меньших толщин (0,27 мм и менее). Это обусловлено все возрастающим интересом к экономии электроэнергии при эксплуатации электротехнических устройств. Вторая тенденция — отказ от применения анизотропной ЭТС и переход на изотропную ЭТС в тех электротехнических устройствах, где это возможно (например, некоторые типы крупных электрических машин, некоторые типы трансформаторов). Это тоже обусловлено чаще всего чисто экономическими соображениями вследствие более низкой стоимости изотропной стали

II

ИЗОТРОПНЫЕ ХОЛОДНОКАТАНЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СТАЛИ

1. Классификация и область применения

Изотропные электротехнические стали предназначены для электрических машин с вращающимися магнитопроводами, генераторов, машинных преобразователей и др. Небольшая

часть этих сталей используется также в сварочных трансформаторах, некоторых видах малых распределительных трансформаторов, реле и других изделиях, где магнитный поток не вращается, но охватывает все направления в плоскости листа

Для снижения магнитных потерь сталь легируют кремнием или кремнием и алюминием и другими элементами. В зависимости от содержания основного легирующего элемента — кремния — стали подразделяются на пять групп (ГОСТ 21427 2—83)

№ по пор.	Группа легирования	Si %	Марки стали
0	Нелегированная	До 0,4	2011, 2012, 2013
1	Низколегированная	0,4—0,8	2111, 2112, 2113*
2	Слаболегированная	0,9—1,8	2211, 2212, 2213*
3	Среднелегированная	1,9—2,8	2311, 2312, 2313*
4	Повышеннолегированная	2,9—3,8	2411, 2412, 2413

* В ГОСТ 21427 2 83 отсутствует изготавливается по техническим условиям

Высоколегированная сталь с содержанием кремния 3,9—5,0% в настоящее время изготавливается только в виде горячекатаных листов. Поскольку по ряду показателей качества горячекатаная сталь не отвечает современным требованиям электромашиностроения, а сам метод является устаревшим и трудоемким, разработаны холоднокатаные аналоги этих сталей, которые изготавливаются в промышленном объеме, начиная с 1988 г. В связи с этим сведения о качестве горячекатаной стали и магнитные зависимости для нее в настоящий справочник не включены¹

ТИПИЧНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗОТРОПНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ

Виды электромаши	Группы легирования				
	0	1	2	3	4
Вращающиеся					
Двигатели и генераторы повышенной и высокой частоты	—	—	—	—	++
Крупные гидро и турбогенераторы, двигатели мощностью 400—1000 кВт и более	—	—	—	—	++
Анизотропные двигатели мощностью, кВт					
50—400	—	—	+	++	+
10—50	—	+	++	+	—
3,75—10	+	++	+	—	—
0,75—3,75	++	++	—	—	—
до 0,75	++	+	—	—	—
Тяговые крановые двигатели, генераторы малой мощности	—	++	+	—	—
Двигатели холодильников и кондиционеров	—	+	++	—	—
Двигатели бытовой техники	++	+	—	—	—
Невращающиеся					
Распределительные и силовые трансформаторы	—	—	—	—	++

¹ См. «Справочник по магнитным и электрическим свойствам горячекатаной электротехнической стали» М. Изд-во Государственного Комитета стандартов Совета Министров СССР, 1971

Виды электромаши	Группы легирования				
	0	1	2	3	4
Реакторы и дроссели магнитных усилителей	—	—	—	—	++
Сварочные трансформаторы	—	—	—	++	+
Трансформаторы радиоаппаратуры (силовые)	—	—	—	—	++
Радиодроссели и трансформаторы телефони	—	—	+	++	+
Реле и полюса двигателей постоянного тока	++	+	+	—	—

Примечание. Знаком «+» отмечена предпочтительная область применения

2. Гарантируемые и типичные характеристики

2.1. Магнитные свойства

Гарантируемый уровень магнитных свойств изотропной электротехнической стали обеспечивается регламентированной технологией производства, в процессе которой достигается низкое содержание примесных элементов (C, N, S, Mn, P) и определенные структура и текстура

Нормируемые ГОСТ 21427 2—83 магнитные свойства изотропной электротехнической стали.

Марка стали	Удельные магнитные потери Вт/кг, не более		Магнитная индукция Тл не менее, при напряженности магнитного поля А/м		Анизотропия магнитной индукции ΔB ₁₀₀₀ , Тл не более
	P _{15/50}	P _{15/50}	1000	2500	
2011	3,5	8,0	1,49	1,60	0,13
2012	2,9	6,5	1,50	1,62	0,13
2013	2,5	5,6	1,54	1,65	0,13
2211	2,6	5,8	1,40	1,56	0,13
2212	2,2	5,0	1,42	1,60	0,13
2213*	2,0	4,6	1,42	1,60	0,13
2411	1,6	3,6	1,37	1,49	0,16
2412	1,3	3,1	1,35	1,50	0,16

* По техническим условиям ТУ 14 1 3674—83

Нелегированная (до 0,4% Si) сталь марок 2011, 2012, 2013 поставляется в нагартованном состоянии. Для получения требуемых магнитных свойств детали магнитопровода подвергают отжигу, поэтому аттестацию этих марок стали на металлургических заводах проводят на образцах, отожженных по режиму, указанному в ГОСТ 21427 2—83: нагрев в защитной атмосфере не выше 830° С, выдержка при этой температуре не более 2 ч, охлаждение до 600° С со скоростью 50° С/ч, далее с печью.

Легированную сталь марок 2211, 2212, 2213, 2411, 2412 поставляют в термически обработанном состоянии с уровнем магнитных свойств, гарантируемым стандартом, образцы для измерения магнитных свойств не подвергают отжигу для снятия напряжений после порезки.

Типичные значения магнитных свойств отечественной изотропной стали:

Завод-изготовитель	Марка стали	Магнитные свойства		
		$R_{1,5/30}$ Вт/кг	B_{1500} Тл	ΔB_{1500} Тл
КарМК	2011	6,90	1,64	0,08
	2012	6,20	1,65	
ВИЗ	2213	4,45	1,61	0,05
	2411	3,30	1,59	
ЧерМК	2211	4,64	1,58	0,06
	2212	4,65	1,61	
	2411	3,37	1,54	0,08
	2012	5,54	1,63	
	2013	4,90	1,67	0,09

2.2. Сортамент и геометрия

Изотропные электротехнические стали изготавливают в виде полос и листов

Размеры по толщине и допускаемые отклонения.

Толщина, мм	0,35	0,50	0,65
Предельные отклонения, мм при точности прокатки			
нормальной	$\pm 0,03$	$\pm 0,04$	$\pm 0,05$
повышенной	$\pm 0,02$	$\pm 0,03$	$\pm 0,04$

Ширина рулонов, листов и ленты и допускаемые отклонения

Ширина мм	Предельные отклонения при точности изготовления мм	
	нормальной	повышенной
1065, 1050, 1030, 1015, 1000, 990, 985, 965, 935, 905, 880, 865, 860, 840, 825, 815, 805, 750, 740, 670, 660, 600, 530, 500, 445, 400, 360, 325, 322, 300, 290, 280, 260	+0,5%	+1,0
250, 233, 226, 215, 200, 187, 175, 170, 160, 156, 150, 140, 138, 130, 123, 107, 95, 90	+1,2	+0,5
	+0,8	+0,5

Геометрия листов, лент, а также качество по поверхности характеризуются неплоскостностью и коэффициентом заполнения

Допускаемые отклонения по неплоскостности (в числителе для листа, в знаменателе — для рулонной стали).

	Класс 1	Класс 2
Неплоскостность, мм	4/2	8/4
Отношение высоты волны неплоскостности к ее длине, %	2/1	5/2

Нормируемые значения коэффициента заполнения при толщине 0,35 (I) и 0,50 (II) мм

	I	II
Сталь группы А без покрытия с покрытием	0,96 0,95	0,97 0,96
Сталь группы Б без покрытия с покрытием	0,95 0,95	0,96 0,95

2.3. Механические свойства

Детали магнитопровода изготавливают из стали в основном методом вырубкой, поэтому для изотропной ЭТС установлен определенный уровень механических свойств. Ниже приведены гарантируемые стандартom и типичные механические свойства

Гарантируемые ГОСТ 21427-83			Типичные			
Марка стали	σ_b , Н/мм	δ_5 , %	Марка стали (завод-изготовитель)	σ_b , Н/мм	δ_5 , %	НВ5
2011 2012 2013	30—50	≤ 30	2011, 2012 (КарМК) 2012, 2013 (ЧерМК)	41 44 40	17 16 29	150—168 145—165
2211 2212 2411	30—60	≤ 30	2211, 2212 (ЧерМК) 2411 (ЧерМК) 2213 (ВИЗ) 2411 (ВИЗ)	34 34 48 42 47	25 25 21 27 20	115—145 165—185 150—165 156—170

2.4. Электроизоляционные покрытия

Электротехнические стали в зависимости от назначения поставляют со следующим состоянием поверхности

А С металлической поверхностью (без покрытия)

Б С покрытиями

— термостойким, не ухудшающим штампуемости (М),

— нетермостойким электроизоляционным, улучшающим штампуемость (НШ),

— термостойким электроизоляционным, улучшающим штампуемость (ТШ),

— термостойким электроизоляционным, не ухудшающим штампуемости (Г)

Ниже приведены данные о состоянии поверхности изотропных сталей различных групп легирования, поставляемых в термически обработанном виде (ГОСТ 21427-83).

Марка стали	Толщина мм	Без покрытия	С покрытием типа		
			М	Т Ш НШ	
2111	0,65, 0,50	+	—	+	
2112	0,65, 0,50	+	—	+	
2211	0,65, 0,50	+	—	+	
2212	0,65, 0,50	+	—	+	
2311	0,65, 0,50	—	+	+	
2312	0,65, 0,50	—	+	+	
2411	0,50, 0,35	—	+	+	
2412	0,50, 0,35	—	+	+	
2413	0,50, 0,35	—	+	+	

Примечания:
1 Тип покрытия в зависимости от марки и назначения стали устанавливается по согласованию изготовителя стали с потребителем

2 Знак «+» означает, что сталь поставляется с состоянием поверхности (с покрытием или без него), указанным в соответствующей графе таблицы

Для электроизоляционных покрытий всех видов ГОСТ 21427 2—83 гарантирует толщину покрытия не более 5 мкм на сторону, коэффициент сопротивления — не менее 1,0 Ом·см². Покрытия выдерживают изгиб без образования трещин и отслоений на наружной стороне образцов, изогнутых на 90° вокруг стержня диаметром 20 мм. Термостойкие электроизоляционные покрытия типа Т и ТШ должны сохранять электроизоляционные свойства после отжига стали при 700° С в течение 2 мин на воздухе или 90 мин в нейтральной атмосфере, а покрытие НШ — длительное время при температурах до 200° С.

Коэффициент сопротивления электроизоляционных покрытий определяют по методике ГОСТ 12119—80, другие параметры покрытий — в соответствии с ГОСТ 21427 2—83.

Важнейшим критерием качества покрытий на изотропной стали является их способность улучшать стойкость штампов при обработке стали.

По требованию потребителя сталь может поставляться с нормированием свойств покрытия по указанному параметру. В этом случае покрытие должно обеспечивать улучшение штампуемости в 2, 3 и 4 раза. Нормы штампуемости и другие требования к покрытиям устанавливаются по согласованию изготовителя стали с потребителем.

При поставке стали с электроизоляционными покрытиями систематически (на одном рулоне или одной пачке листов от партии) контролируют их толщину, коэффициент сопротивления и адгезию к металлу.

Сохранность электроизоляционных свойств покрытий типа Т и ТШ после нагрева и других параметров проверяют периодически.

Гарантируемые (ГОСТ 21427 2—83) и типичные параметры, характеризующие качество покрытия термостойкого электроизоляционного покрытия

	Гарантируемые	Типичные
Толщина на одной стороне, мкм	≤ 5	1—3
Коэффициент сопротивления, Ом·см ²	≥ 1,0	4—7
Термостойкость, °С	≥ 700	700
Штампуемость	Улучшение	Улучшение в 2—3 раза

3. Рекомендации по применению изотропной ЭТС

Нелегированную сталь марок 2011, 2012, 2013 поставляют заказчику в нагартованном состоянии, т.е. заключительной операцией на металлургических заводах является холодная прокатка.

Это необходимо в первую очередь для получения стали с высокими прочностными характеристиками, обеспечивающими возможность výroby деталей магнитопровода на быстроходных автоматических прессах. Сталь марок 2011, 2012 и 2013 имеет низкое содержание

кремния (0,4—0,6%) и после термической обработки становится мягкой, что затрудняет вырубку. Для получения требуемого уровня магнитных свойств детали ротора и статора под верстают отжигу у заказчика. Режим отжига, рекомендуемый ГОСТ 21427 2—83, следующий: нагрев в защитной атмосфере не выше 830° С, выдержка при этой температуре не более 2 ч, охлаждение до 600° С со скоростью 50° С/ч, далее с печью. Температура отжига может варьироваться в пределах от 700 до 830° С в зависимости от технологии изготовления данной марки стали на металлургических заводах. Конкретная температура отжига указывается в сертификате.

Поставка стали в нагартованном состоянии и отжиг изделий обеспечивает получение более высокого уровня магнитных свойств, чем в стали, поставляемой после окончательной термической обработки.

Легированную сталь марок 2211, 2212, 2213, 2411 и 2412 поставляют в отожженном состоянии с уровнем магнитных свойств, гарантируемым стандартом.

Деформация при изготовлении деталей магнитопровода нарушает структуру и текстуру металла, что снижает магнитные свойства. Для восстановления магнитных свойств рекомендуется изделия подвергать отжигу в защитной атмосфере при 650—750° С с выдержкой при этой температуре до 2 ч.

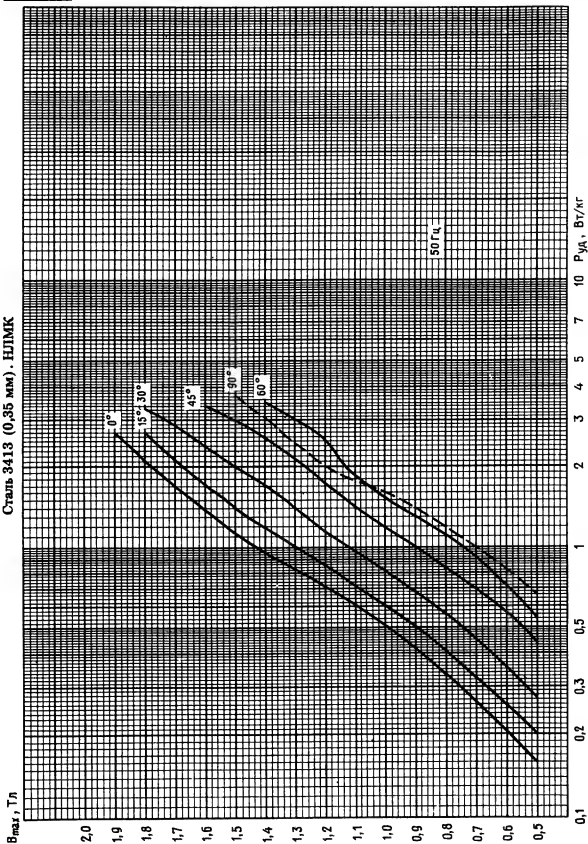
4. Характеристики магнитных свойств

Для проектирования электрических машин и аппаратов недостаточно иметь значения основных магнитных характеристик стали — магнитных удельных потерь $P_{15/50}$ и магнитной индукции B_{2500} .

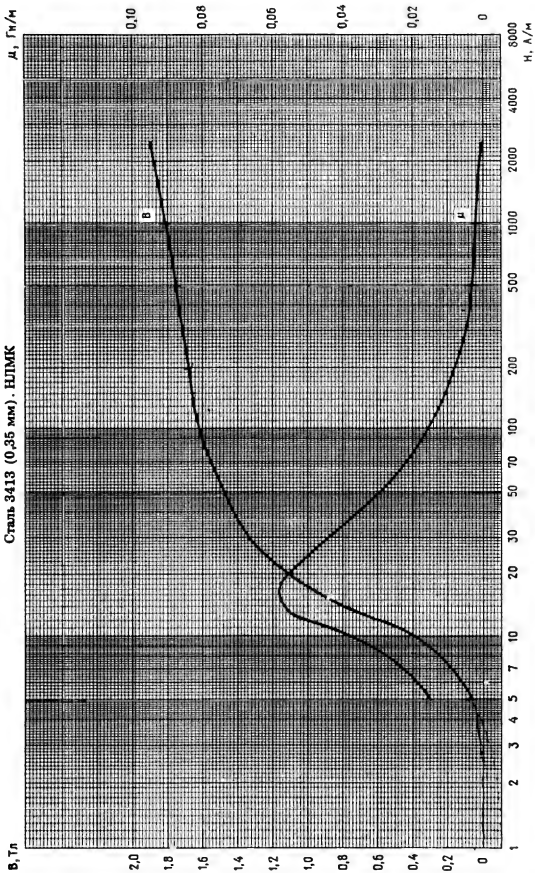
Для стали всех марок были измерены следующие электромагнитные характеристики:

- кривые намагничивания в постоянном поле на смешанной пробе — $B = f(H)$,
- кривые намагничивания в постоянном поле на образцах, вырезанных под различными углами к направлению прокатки,
- статические петли гистерезиса при максимальной индукции $B = 1,0$ Тл и $B = 1,5$ Тл,
- кривые намагничивания в переменном поле с частотой 50 Гц на смешанной пробе — $B_{max} = f(H_{max})$,
- кривые намагничивания в переменном поле с частотой 50 Гц на образцах, вырезанных под различными углами к направлению прокатки,
- зависимость удельных магнитных потерь от амплитуды магнитной индукции при частоте 50 Гц, измеренная на смешанной пробе $P = f(B_{max})$,
- зависимость удельных магнитных потерь от амплитуды магнитной индукции при частоте 50 Гц на образцах, вырезанных под различными углами к направлению прокатки.

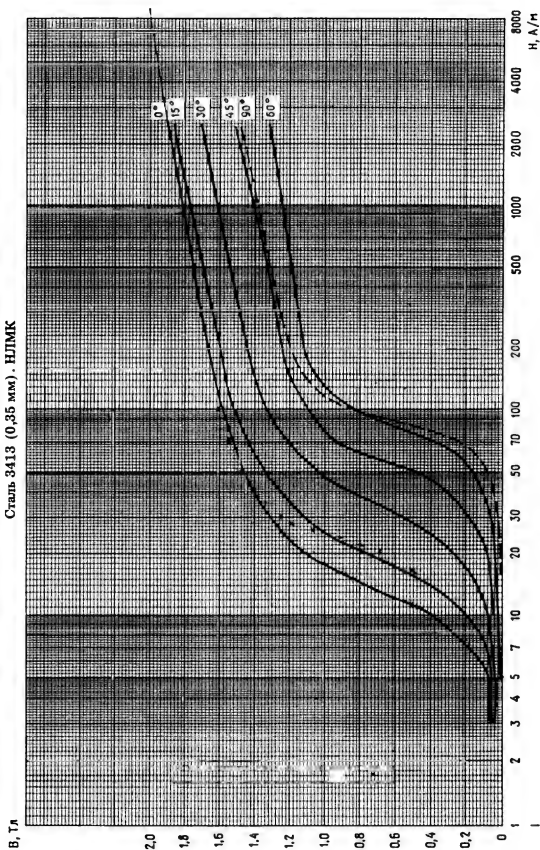
Сталь 3413 (0,35 мм). НЛМК



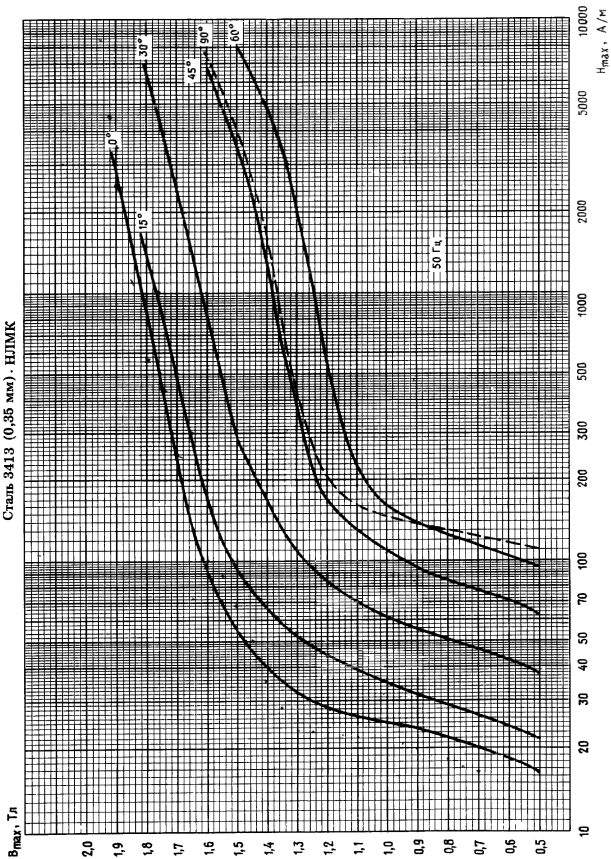
Сталь 3413 (0,35 мм). НЛМК



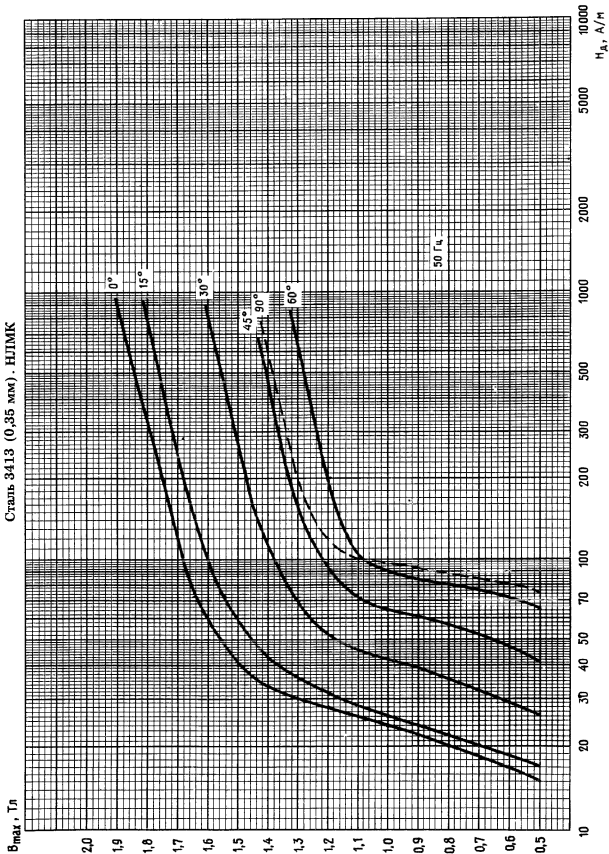
Сталь 3413 (0,35 мм) . НЛМК



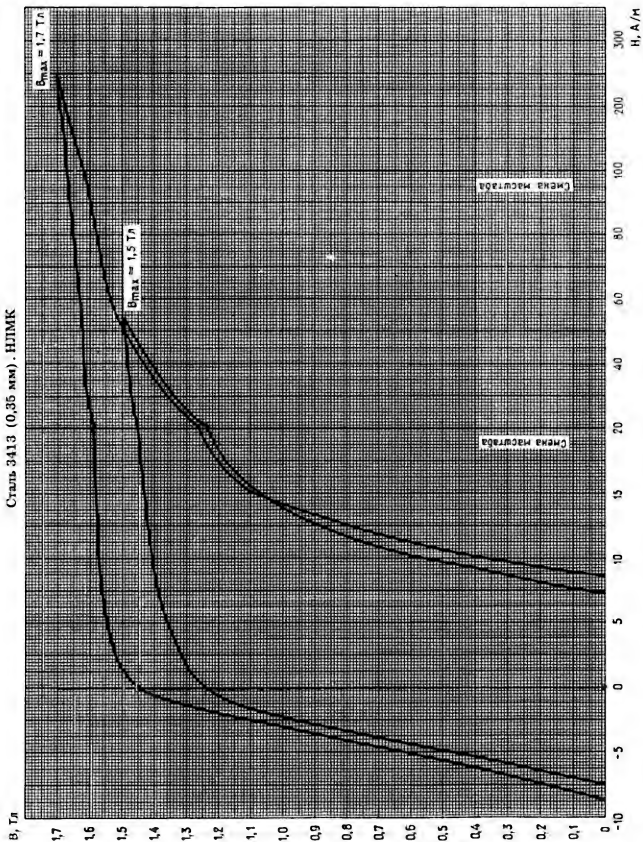
Сталь 3413 (0,35 мм) - НЛМК



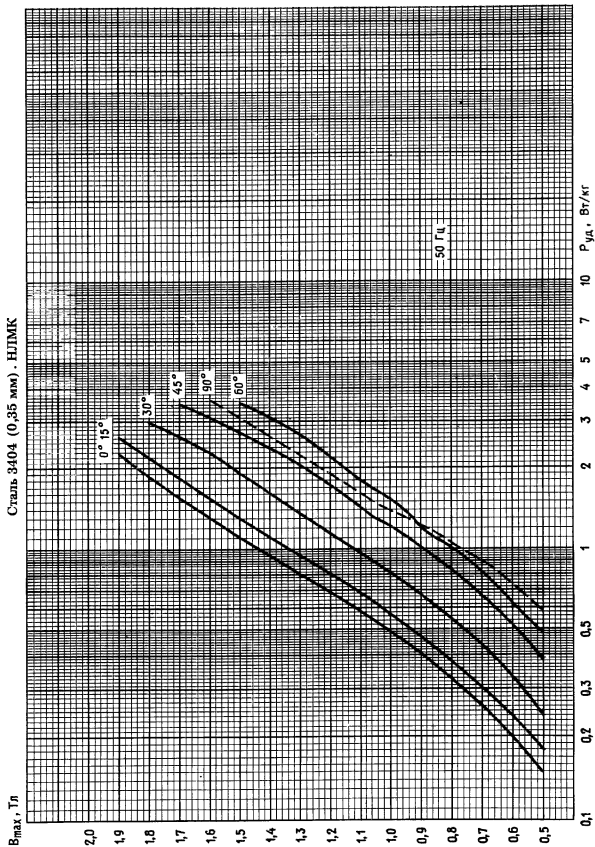
Сталь 3413 (0,35 мм) . НЛМК



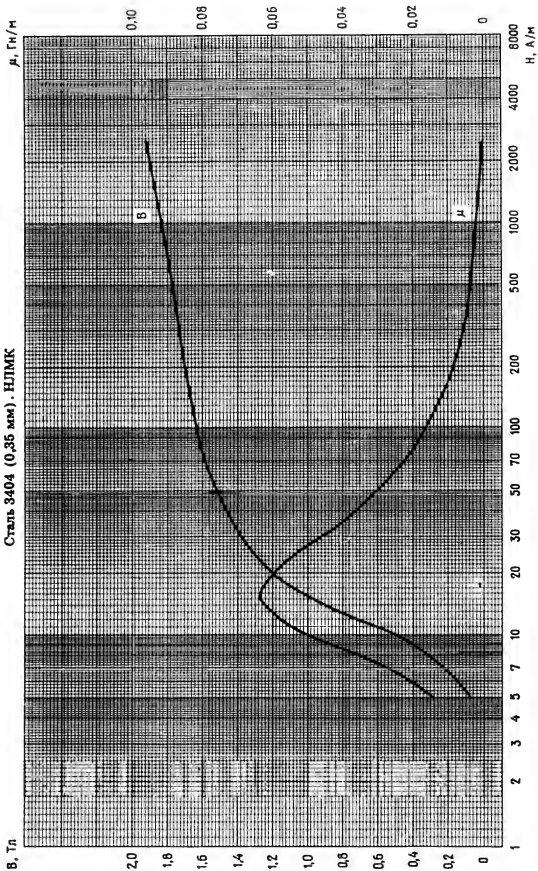
Сталь 3413 (0,35 мм) . НІЛМК



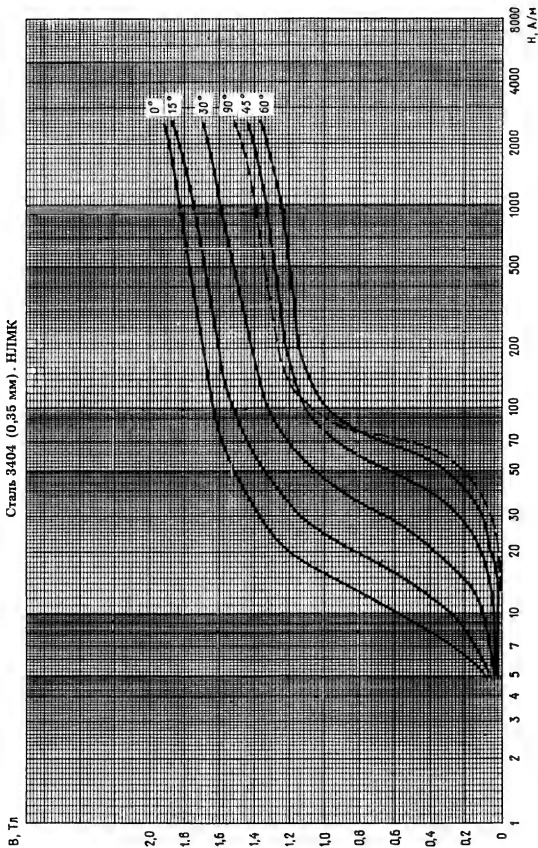
Сталь 3404 (0,35 мм) . НЛМК



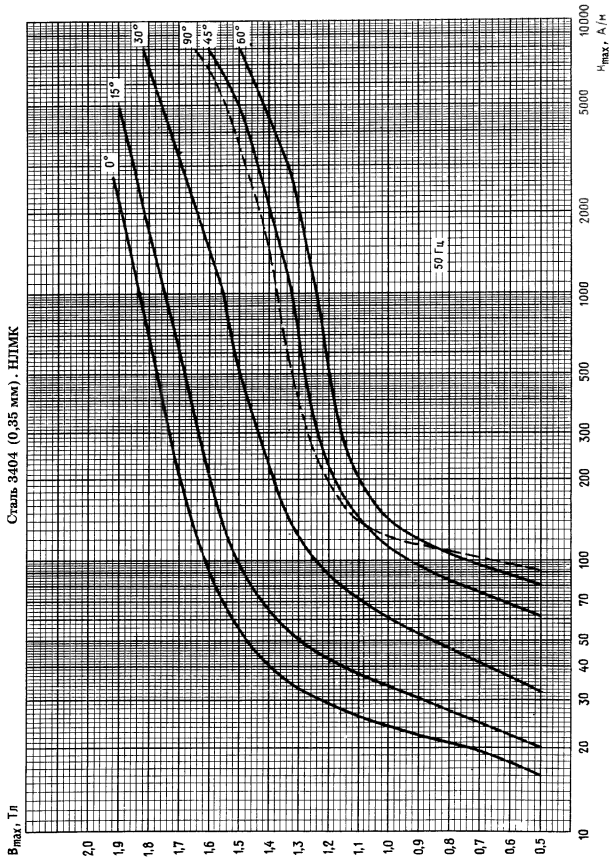
Сталь 3404 (0,35 мм) . НЛМК



Сталь 3404 (0,35 мм) · НЛМК

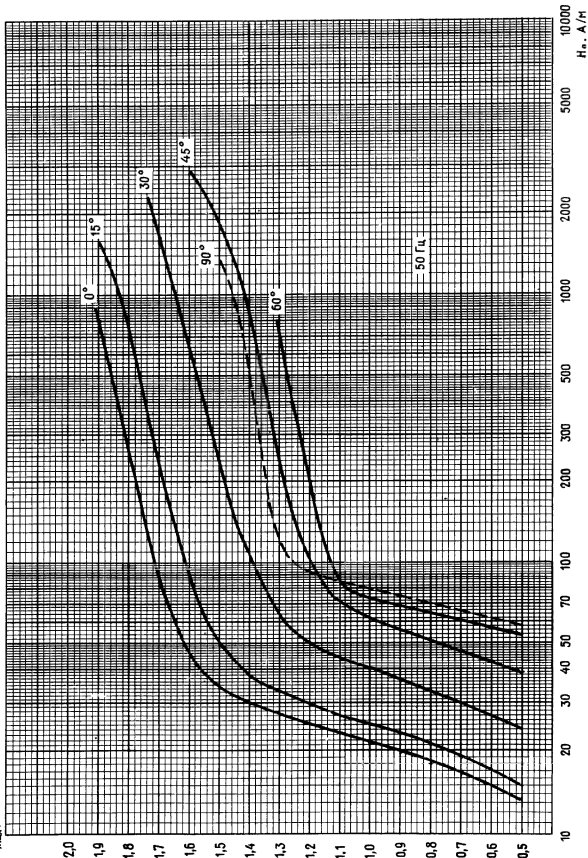


Сталь 3404 (0,35 мм) . НЛМК

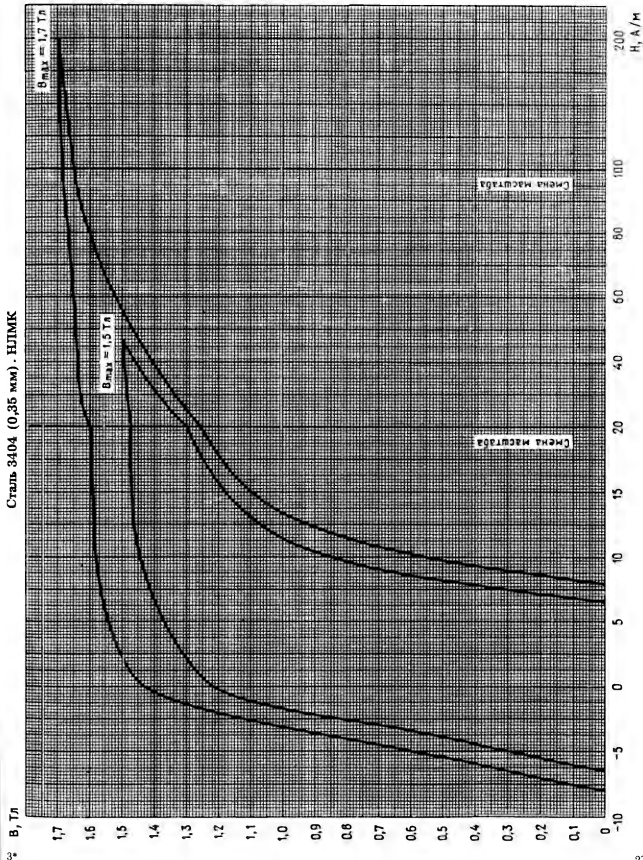


Сталь 3404 (0,35 мм) . НЛМК

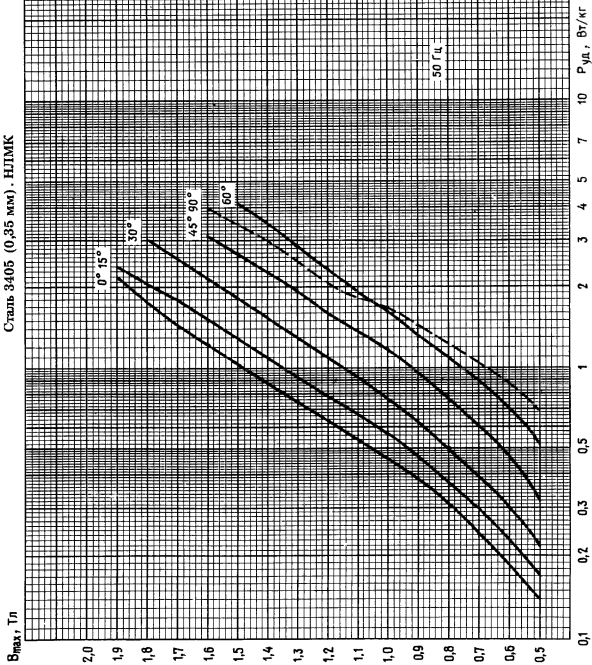
$V_{max}, Tл$



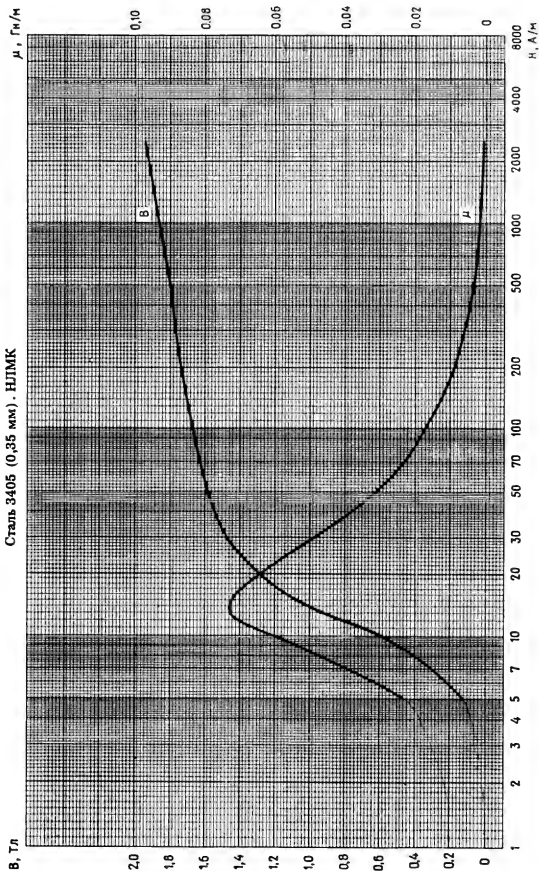
Сталь 3404 (0,35 мм) . НЛМК



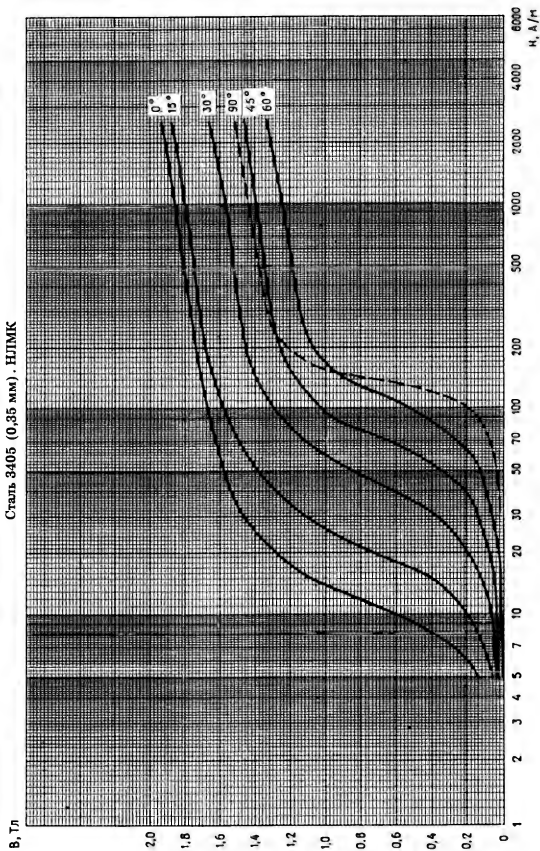
Сталь 3405 (0,35 мм). НЛМК



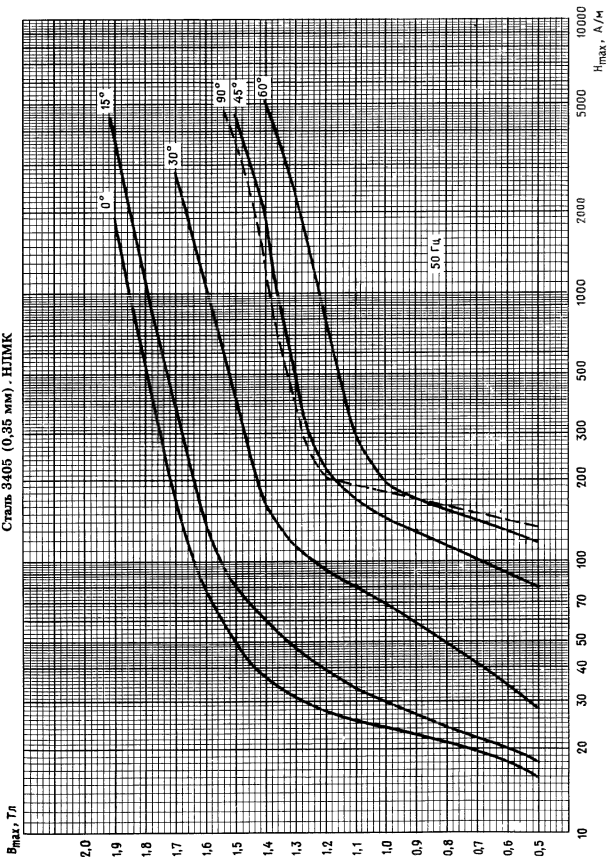
Сталь 3405 (0,35 мм) - НЛМК



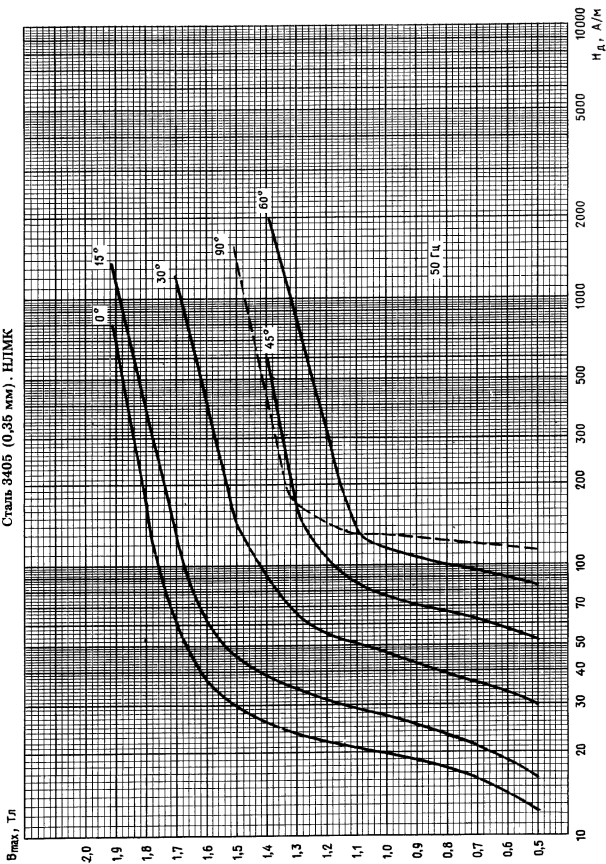
Сталь 3405 (0,35 мм) . НЛМК



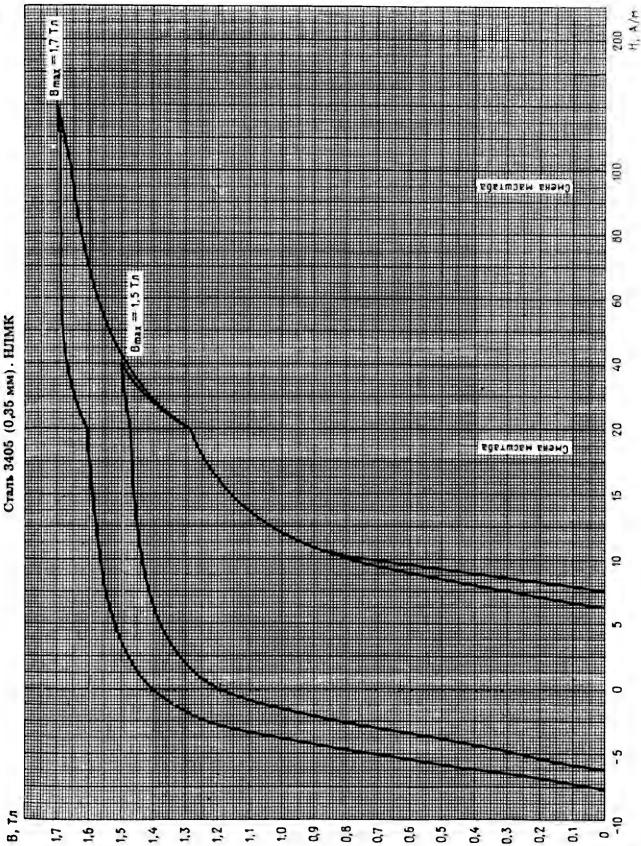
Сталь 3405 (0,35 мм) . НЛМК



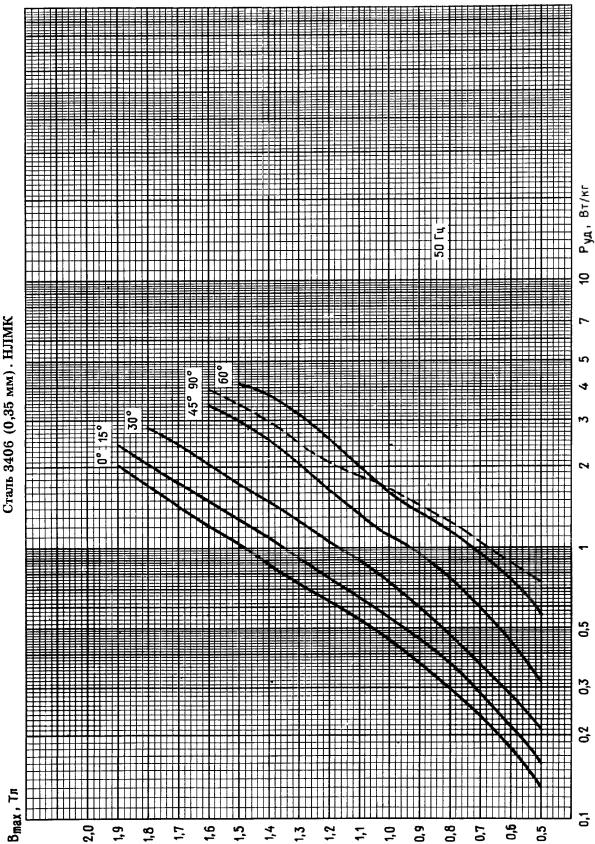
Сталь 3405 (0,35 мм) . НЛМК



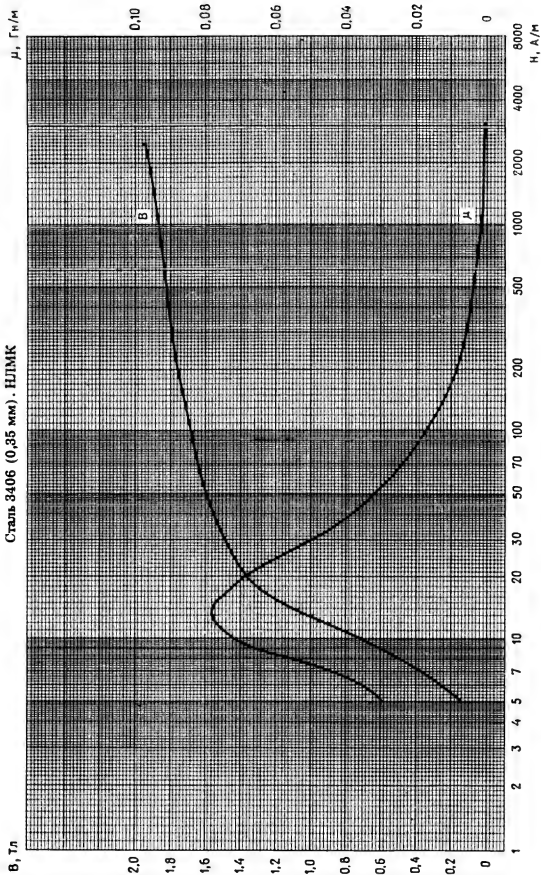
Сталь 3405 (0,35 мм) . НЛМК



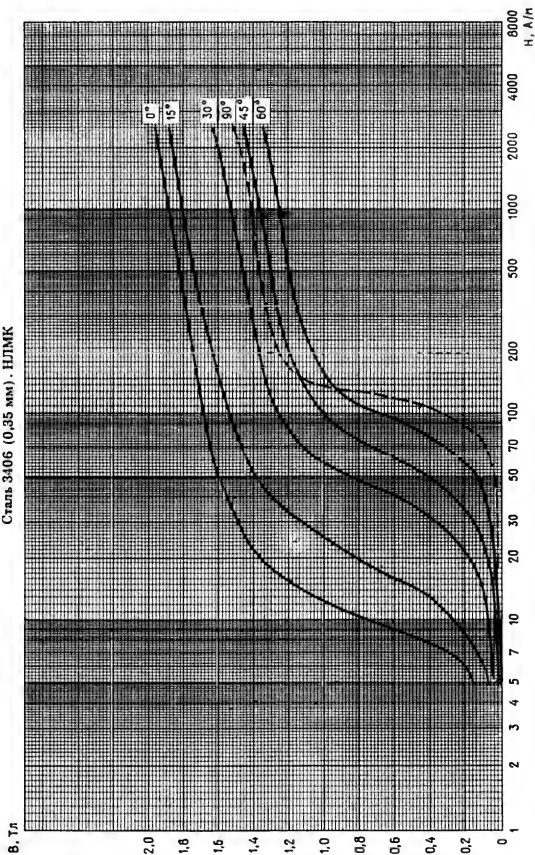
Сталь 3406 (0,35 мм) . НЛМК



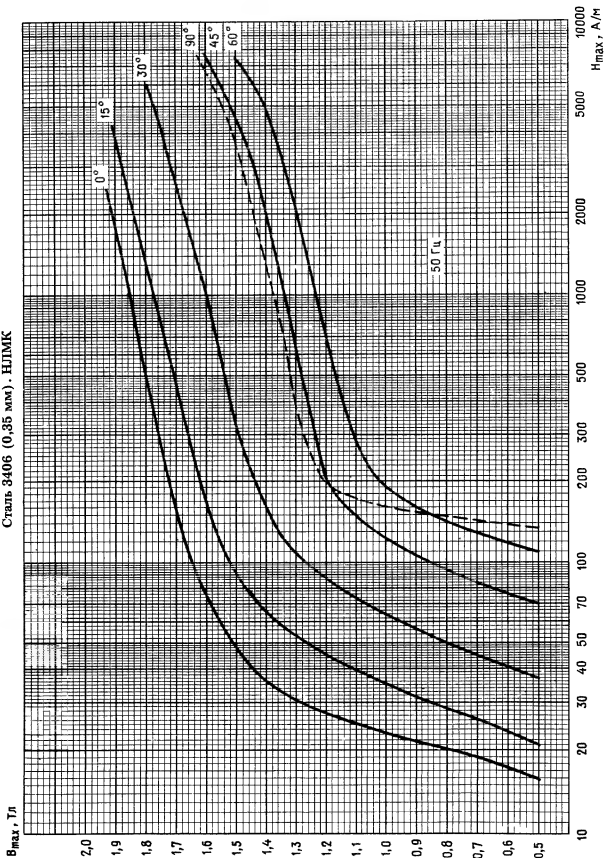
Сталь 3406 (0,35 мм). НЛМК

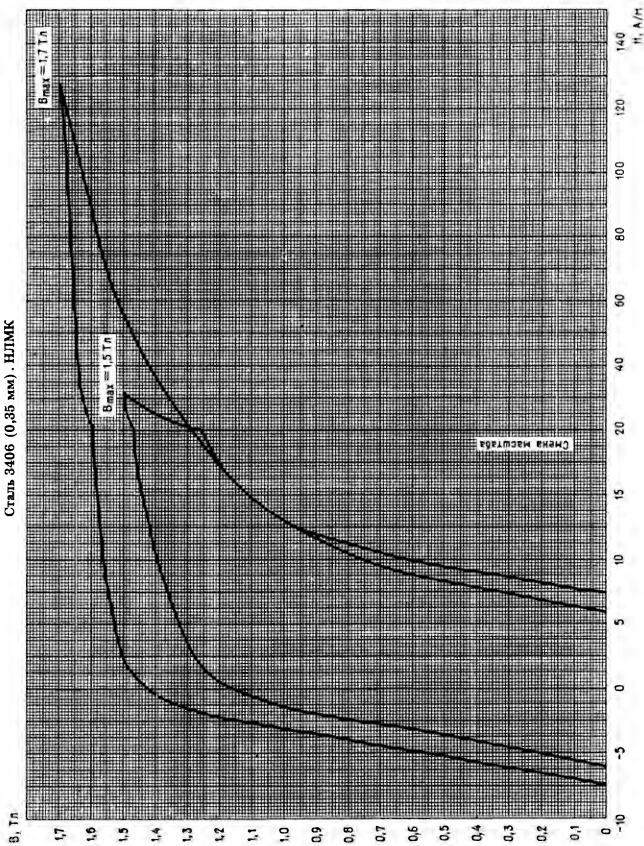


Сталь 3406 (0,35 мм) . НЛМК



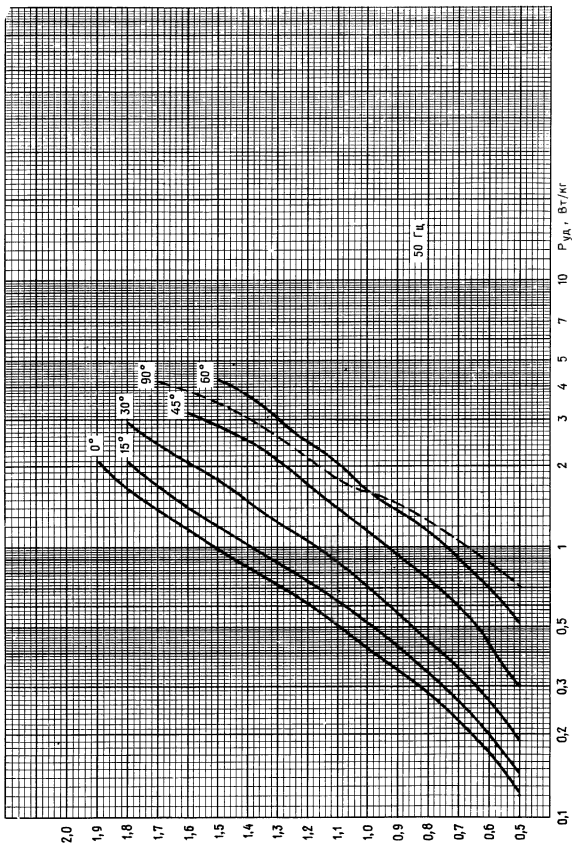
Сталь 3406 (0,35 мм) · НЛМК



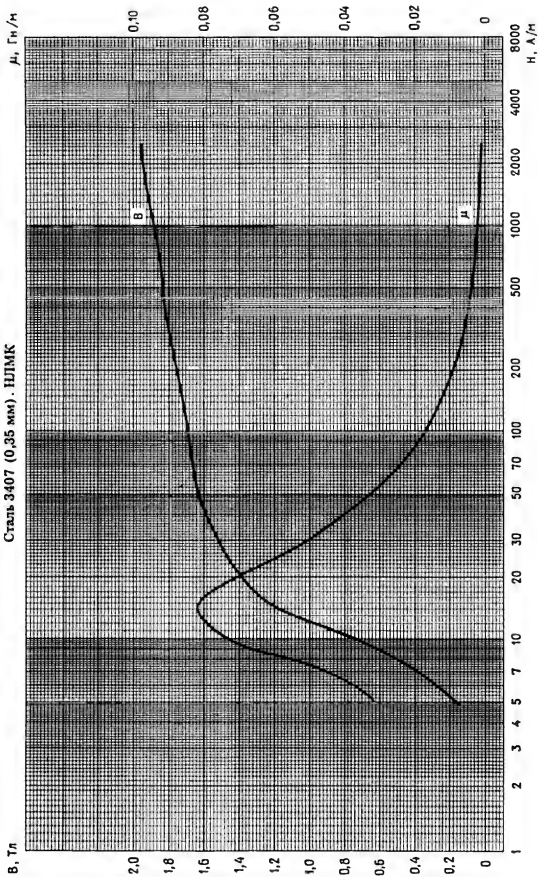


Сталь 3407 (0,35 мм) . НЛМК

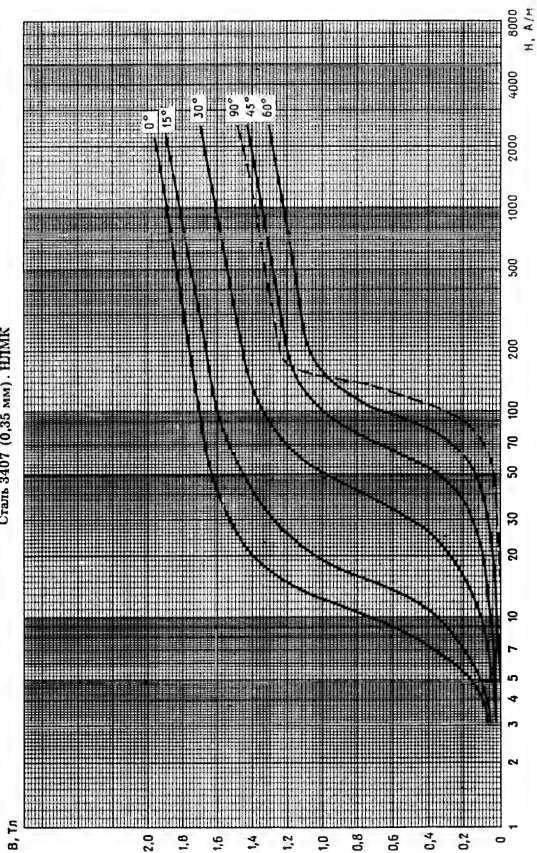
$B_{max}, Tл$



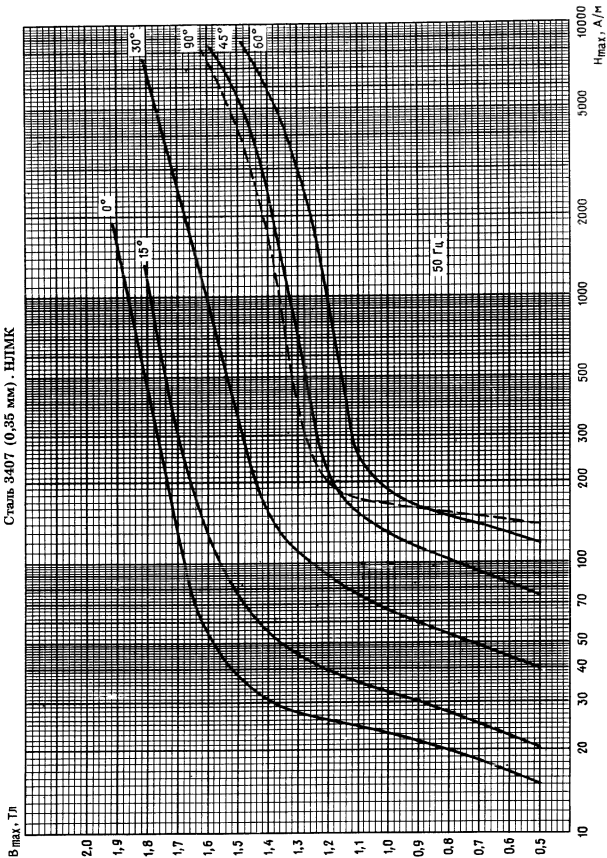
Сталь 3407 (0,35 мм) . ШІМК



Сталь 3407 (0,35 мм) . ЇЛІМК

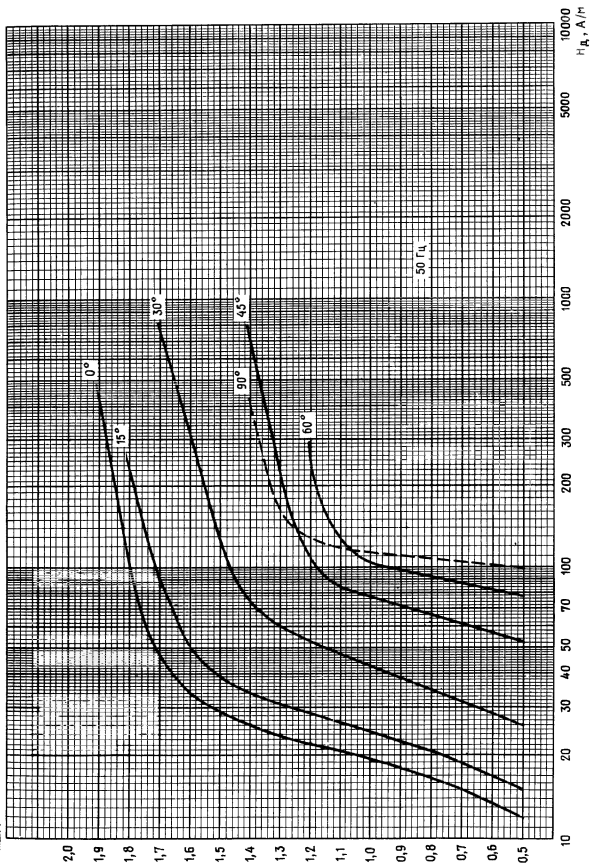


Сталь 3407 (0,35 мм) . НЛМК

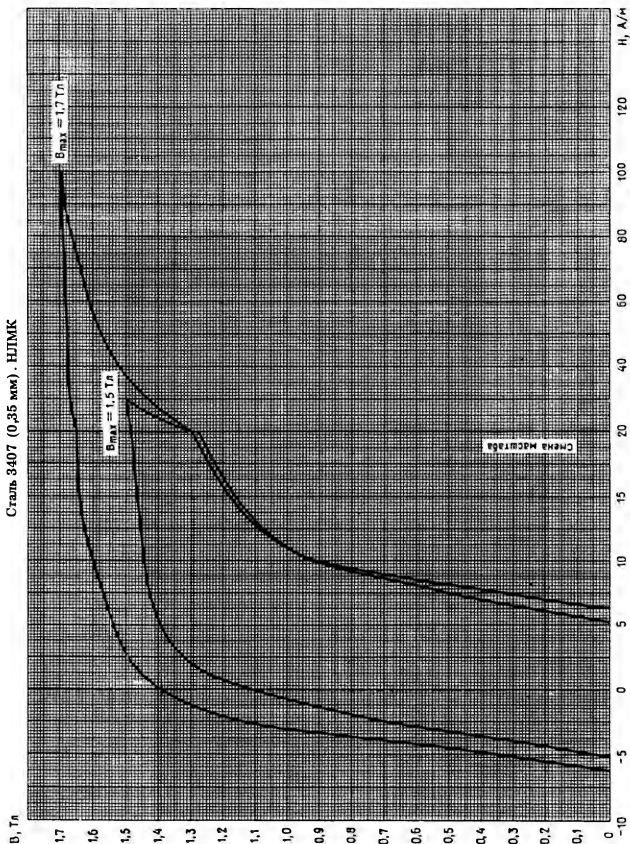


Сталь 3407 (0,35 мм) . НЛМК

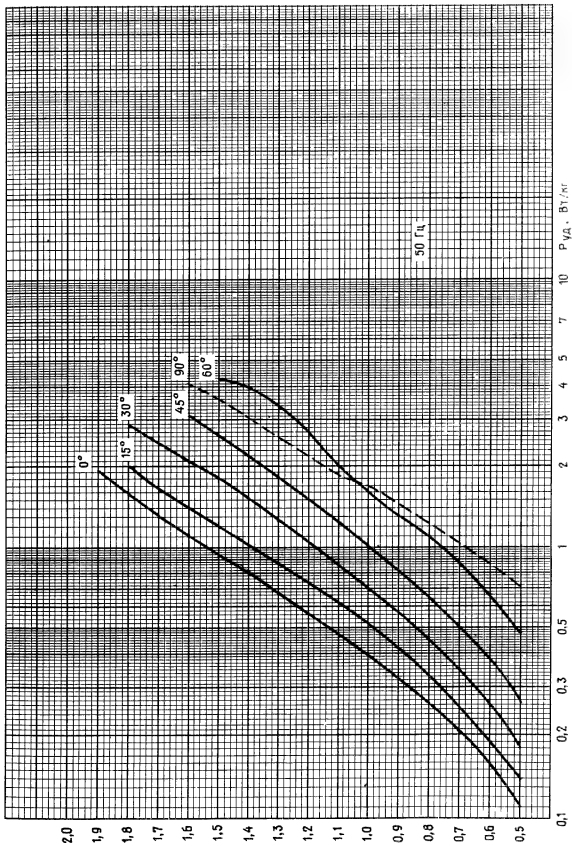
$\sigma_{max}, \text{Тл}$



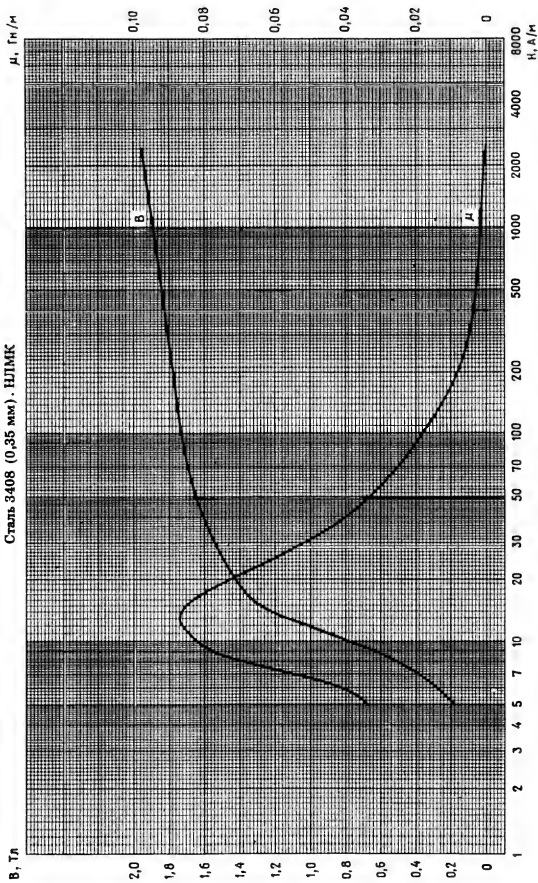
Сталь 3407 (0,35 мм) . НЛМК



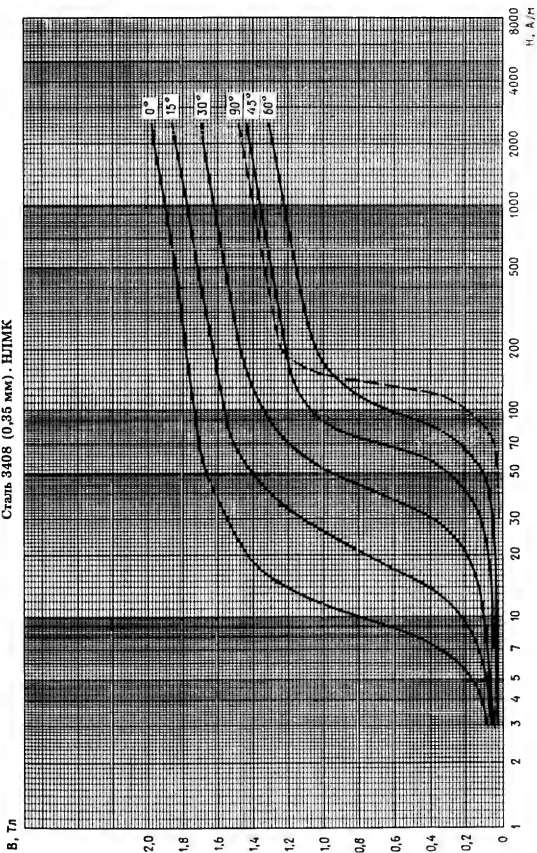
$V_{max}, Tл$



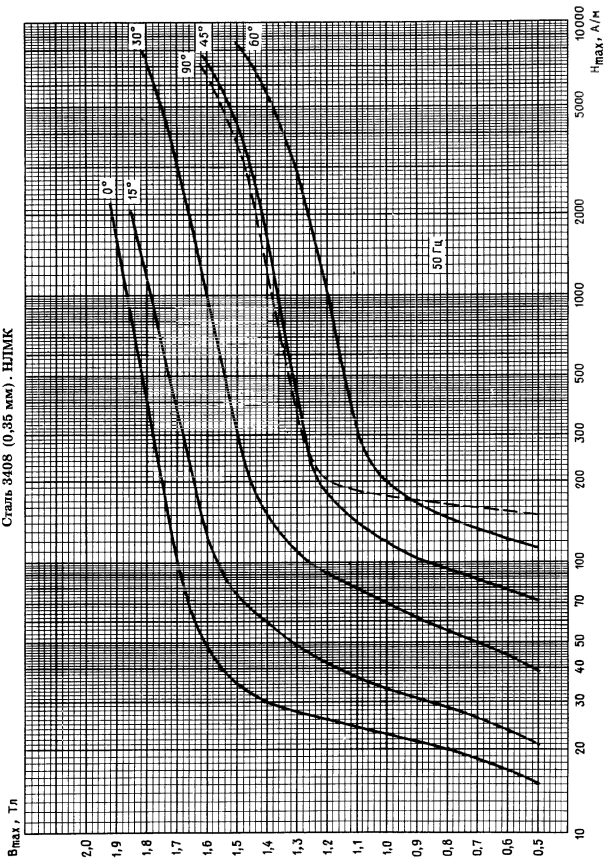
Сталь 3408 (0,35 мм) . ІІЛМК



Сталь 3408 (0,35 мм). НЛМК

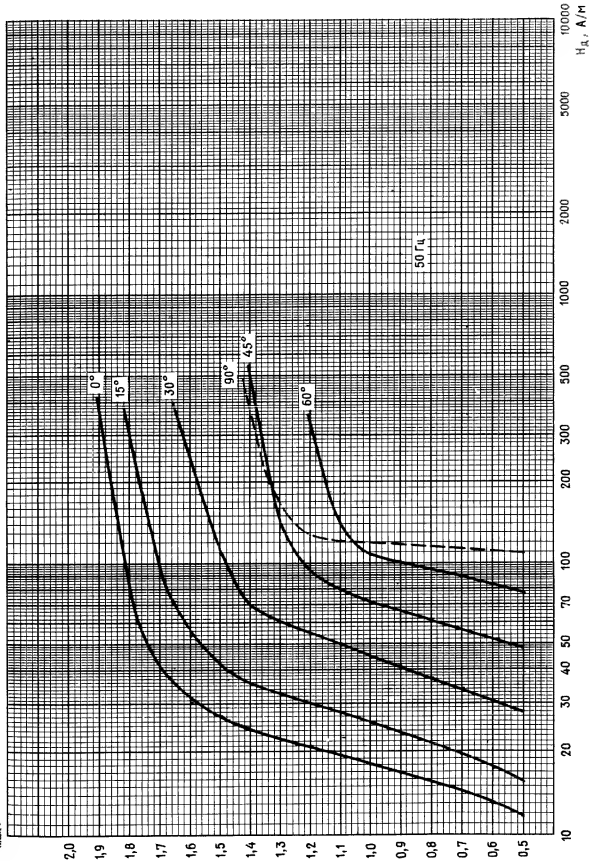


Сталь 3408 (0,35 мм) . НЛМК

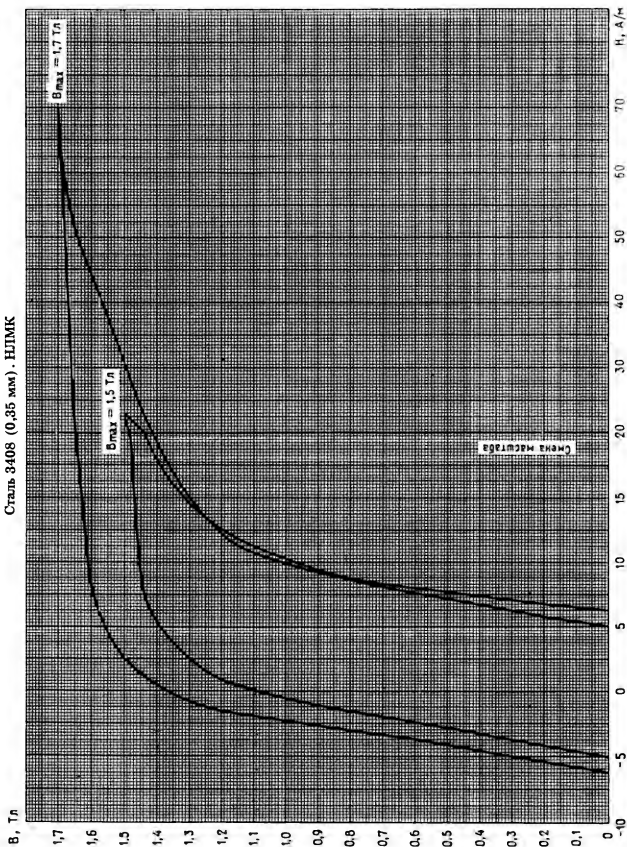


Сталь 3408 (0,35 мм) . НЛМК

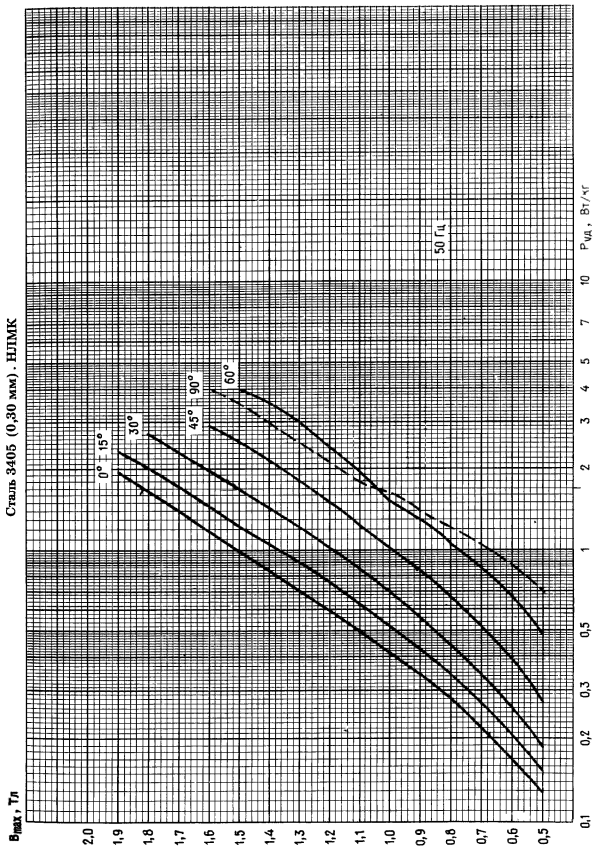
σ_{max} , Тл



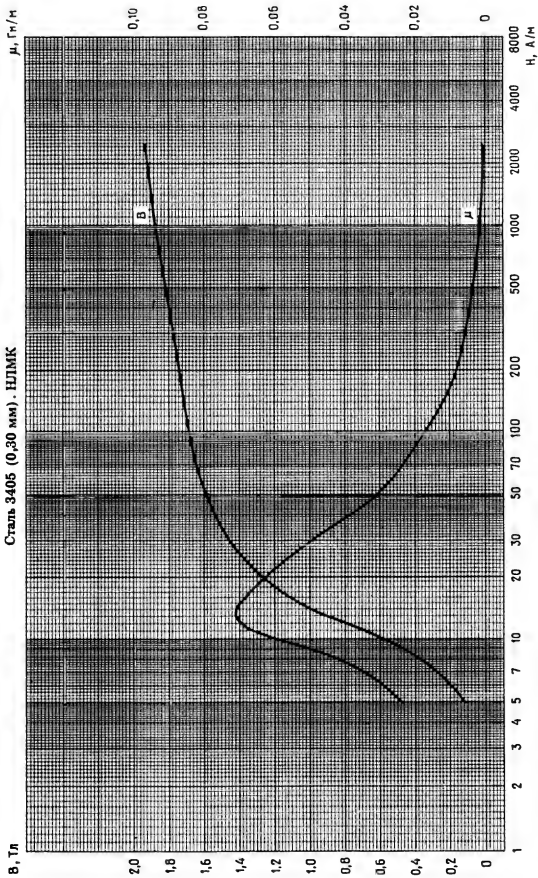
Сталь 3408 (0,85 мм) . НЛМК



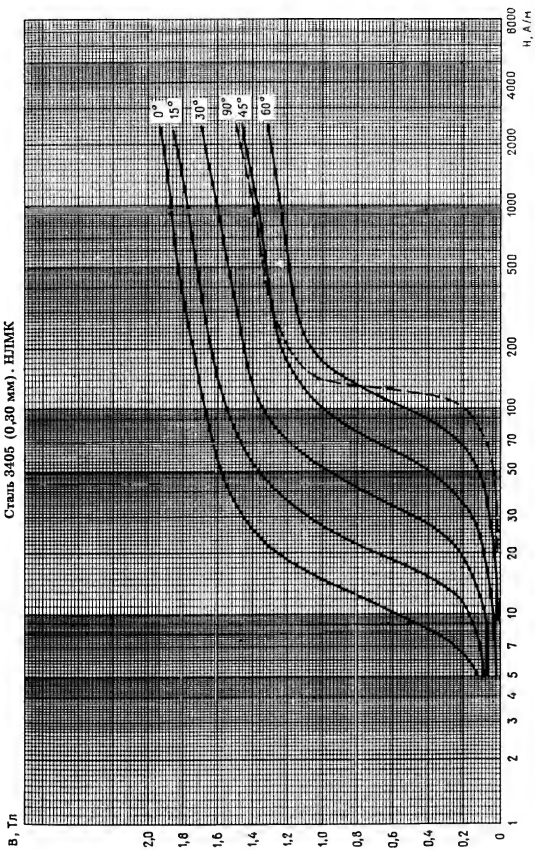
Сталь 3405 (0,30 мм) . НЛМК



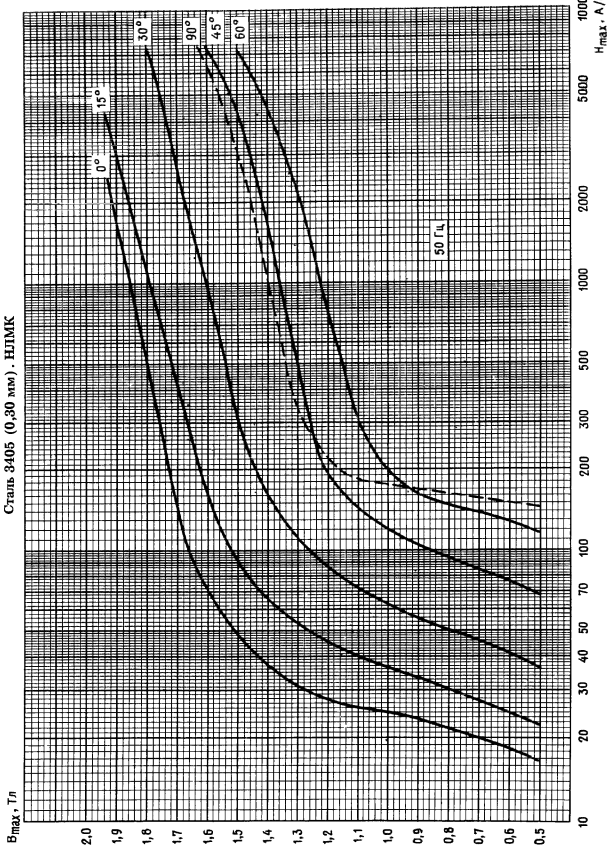
Сталь 3405 (0,30 мм) - НЛМК



Сталь 3405 (0,30 мм) . НЛМК

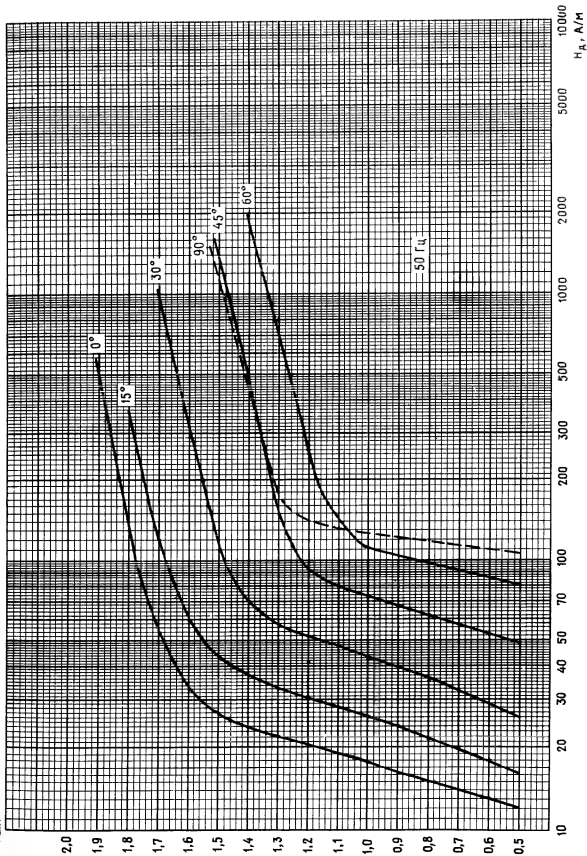


Сталь 3405 (0,30 мм) . НЛМК

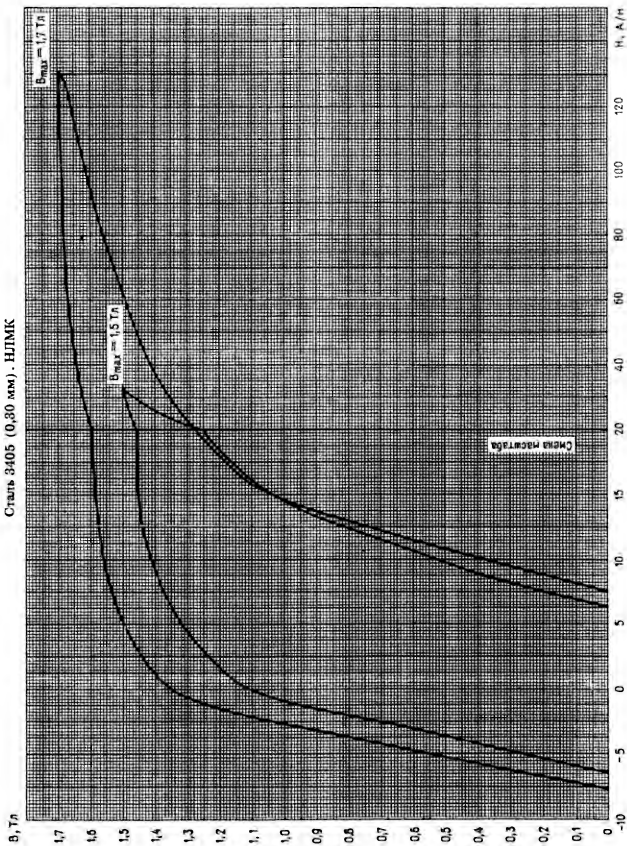


Сталь 3405 (0,30 мм) . НЛМК

$\sigma_{max}, \text{Тл}$

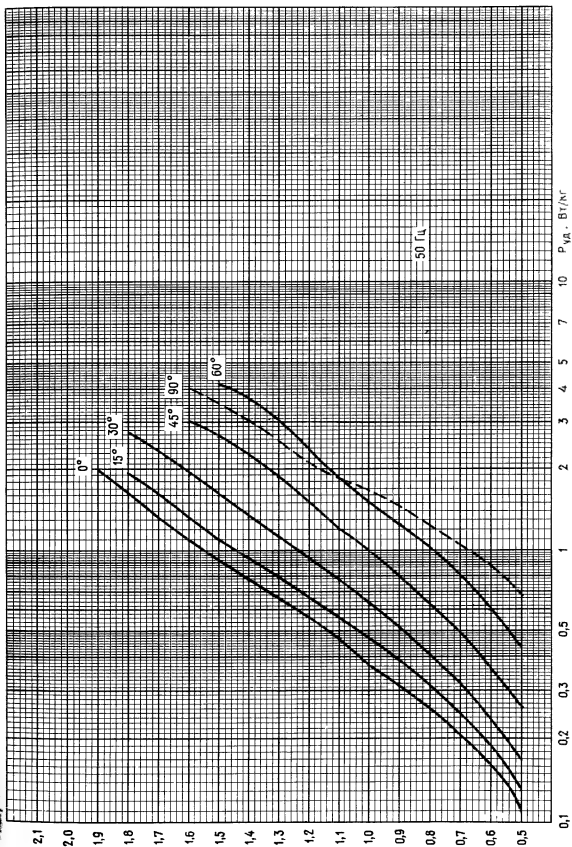


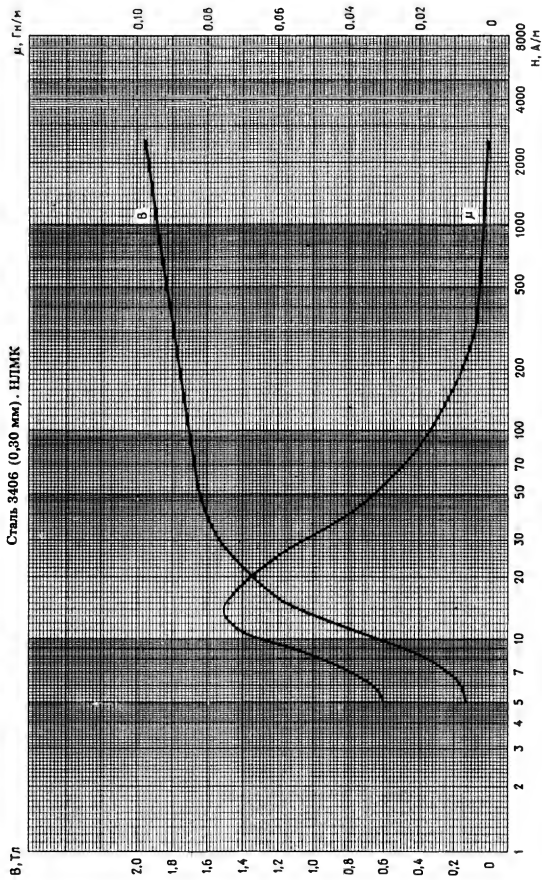
Сталь 3405 (0,30 мм) . НЛМК



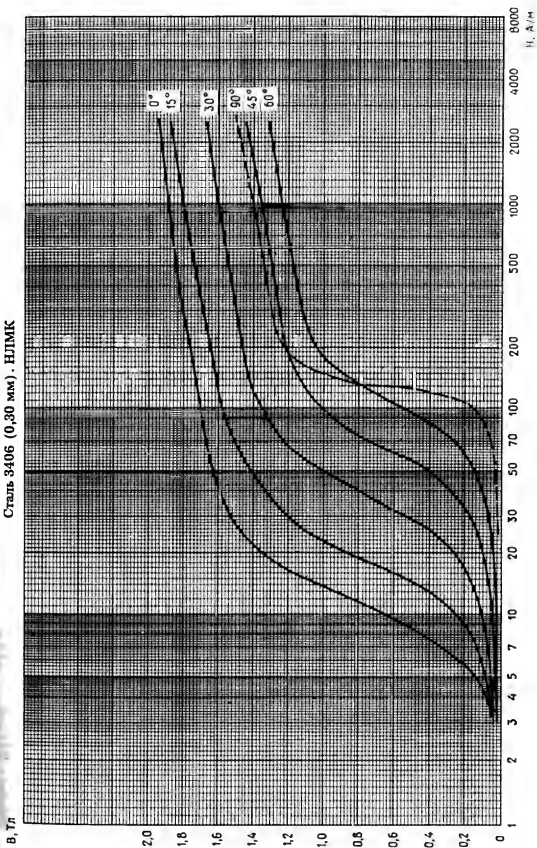
Сталь 3406 (0,30 мм) . НЛМК

$\sigma_{max}, \text{Тн}$

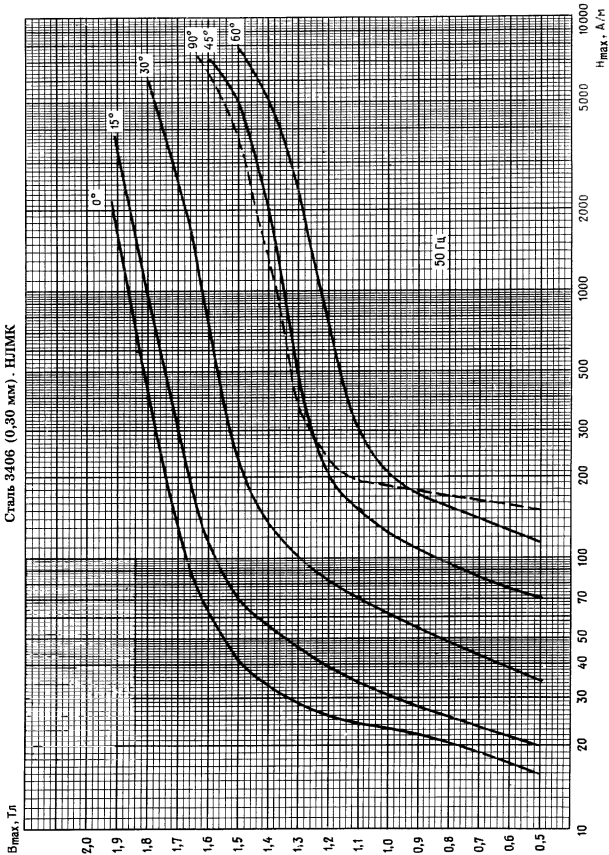


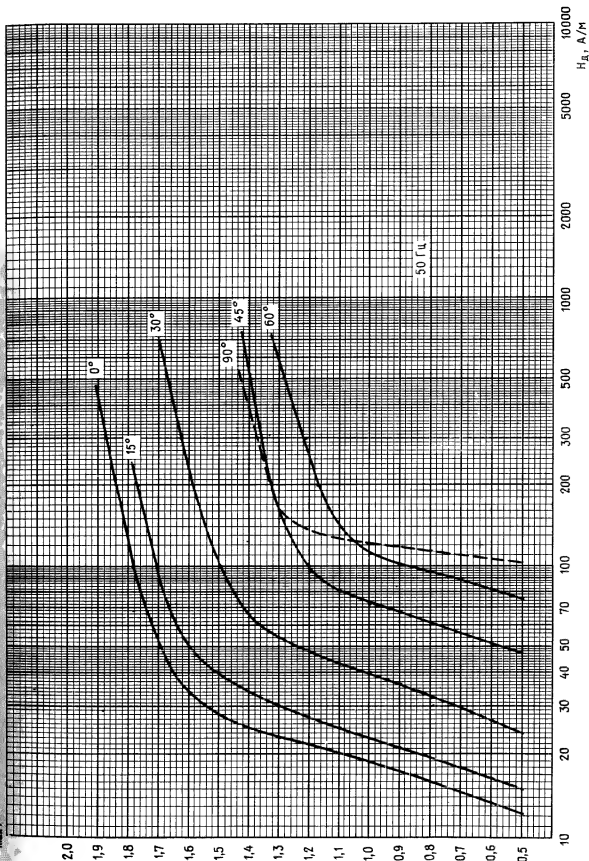


Сталь 3406 (0,30 мм) . НЛМК

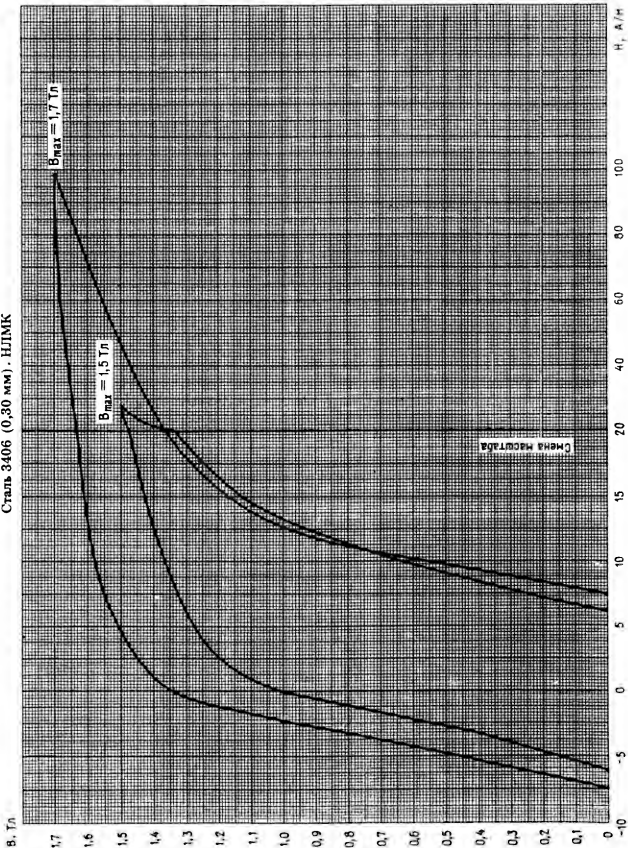


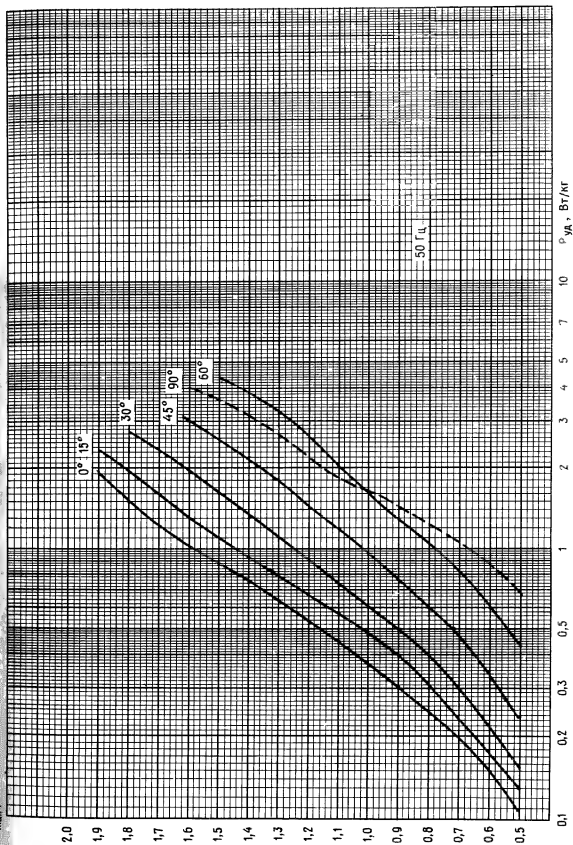
Сталь 3406 (0,30 мм) . НЛМК



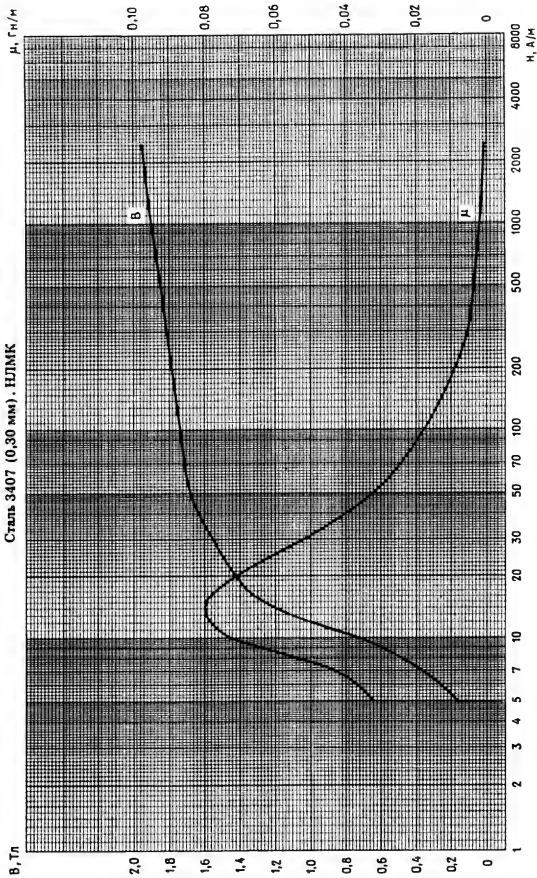


Сталь 3406 (0,30 мм) · НІЛІК

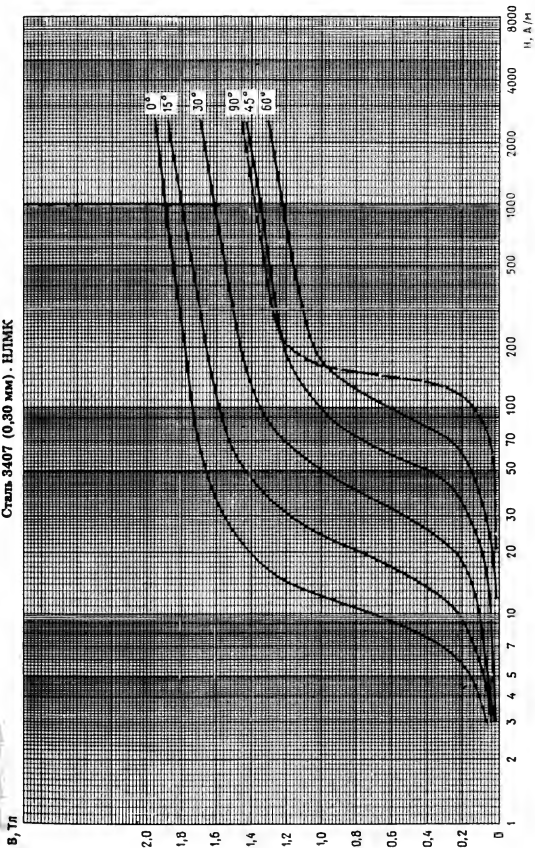




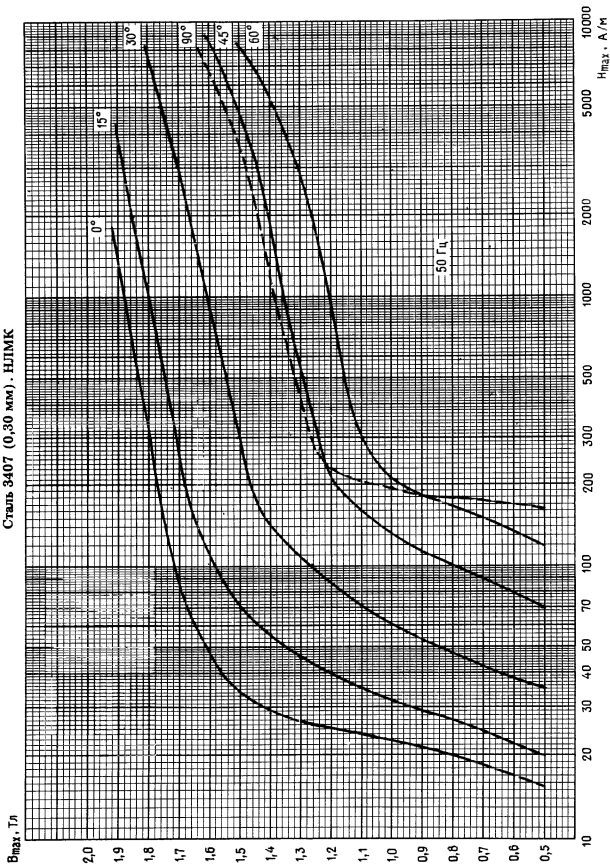
Сталь 3407 (0,30 мм) . НЛМК

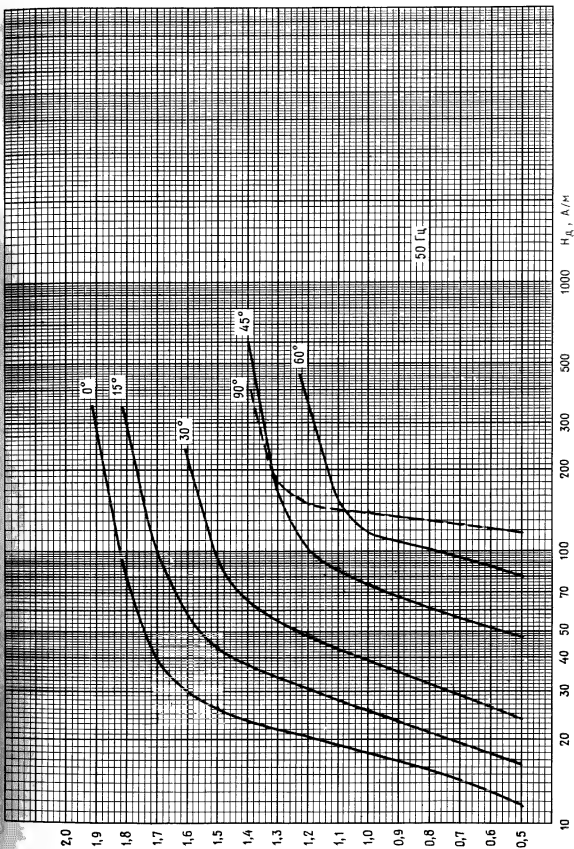


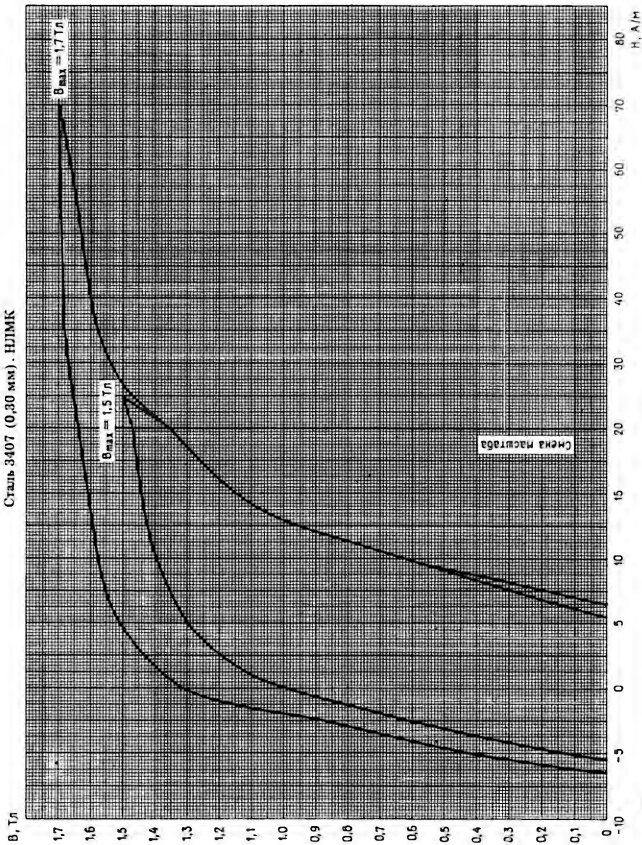
Сталь 3407 (0,30 мм) - НЛМК



Сталь 3407 (0,30 мм). НЛМК

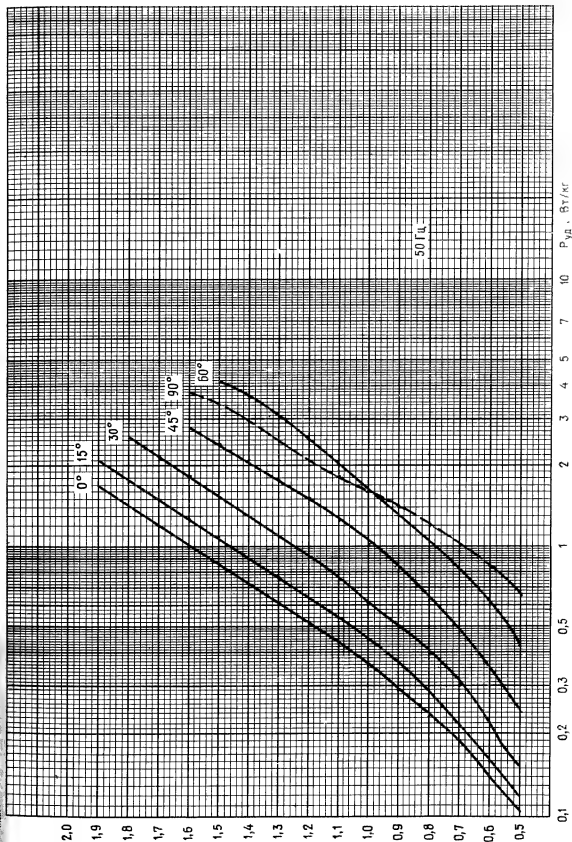




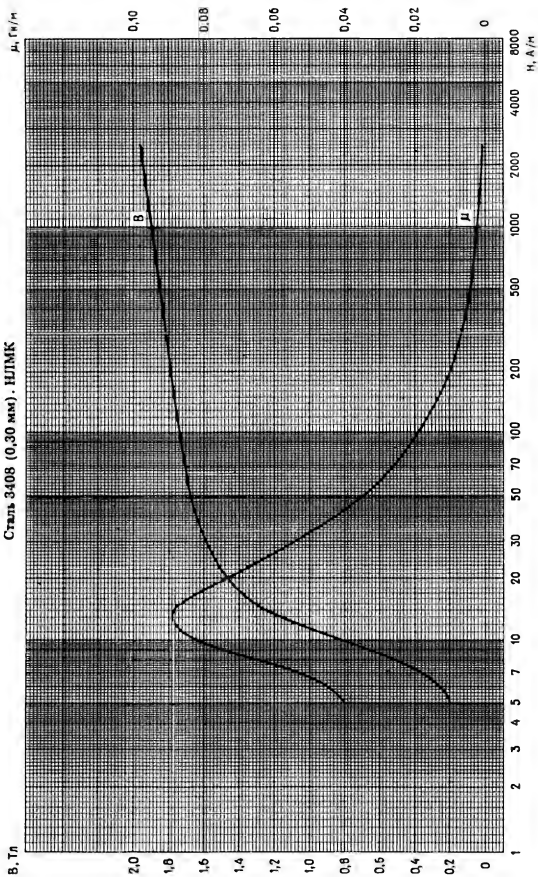


Сталь 3408 (0,30 мм) · НІІМК

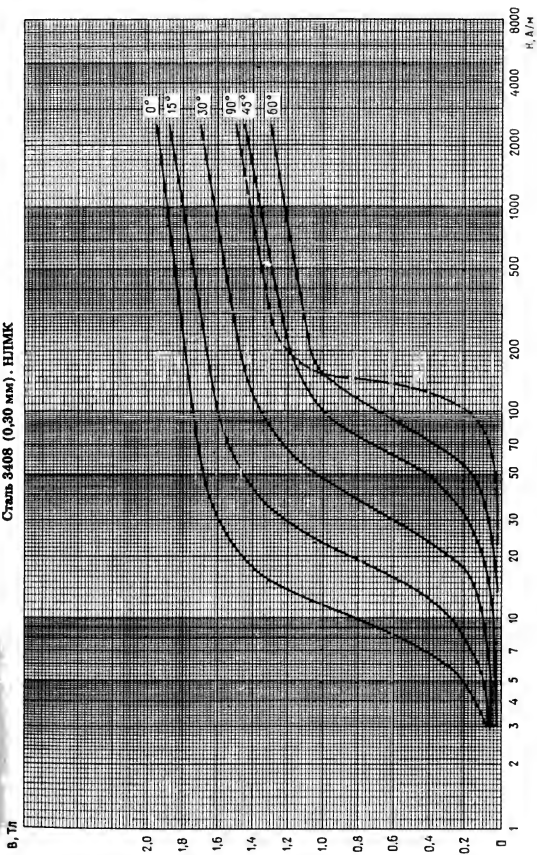
$\sigma_{\max}$, ГПа



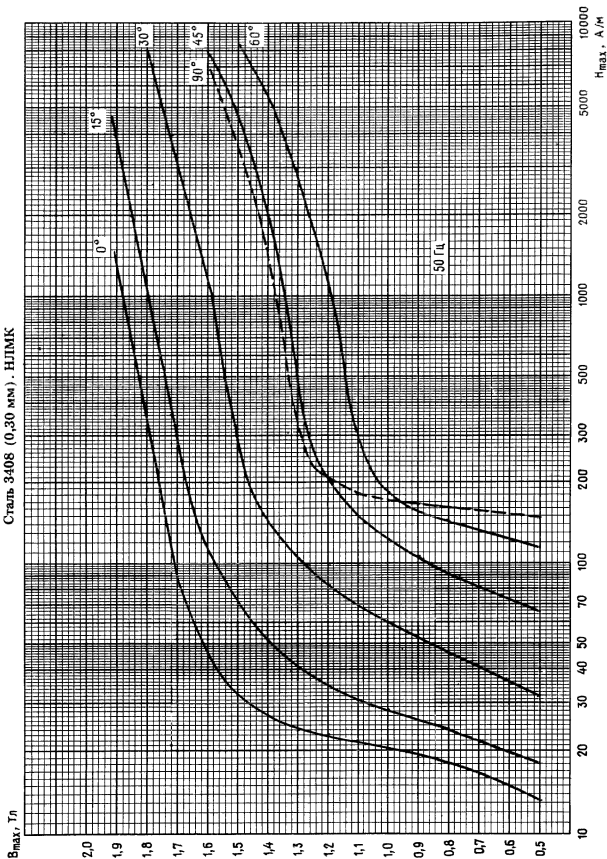
Сталь 3408 (0,30 мм) . ИЛМК



Сталь 3408 (0,30 мм). НЛМК

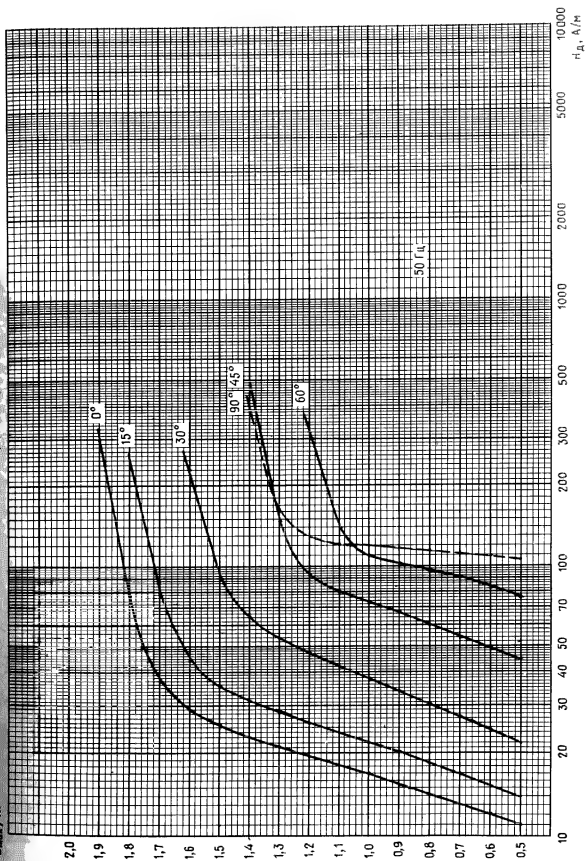


Сталь 3408 (0,30 мм) . НЛМК

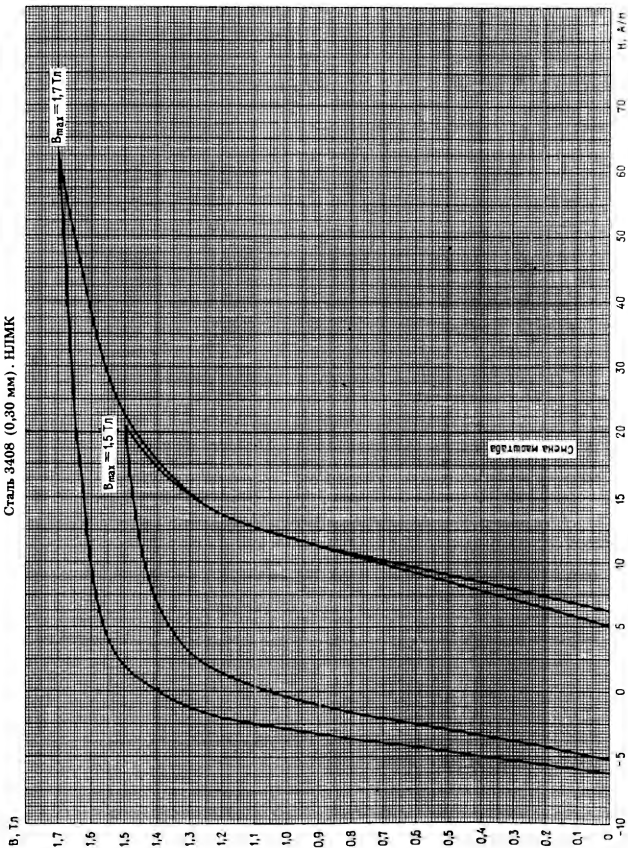


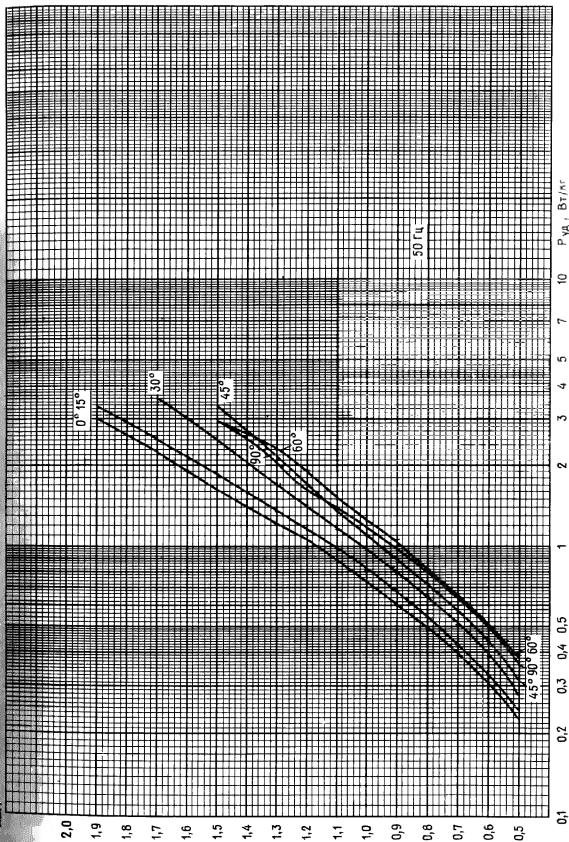
Сталь 3408 (0,30 мм) ЕЛМК

$\sigma_{\text{max}}, \text{ГПа}$

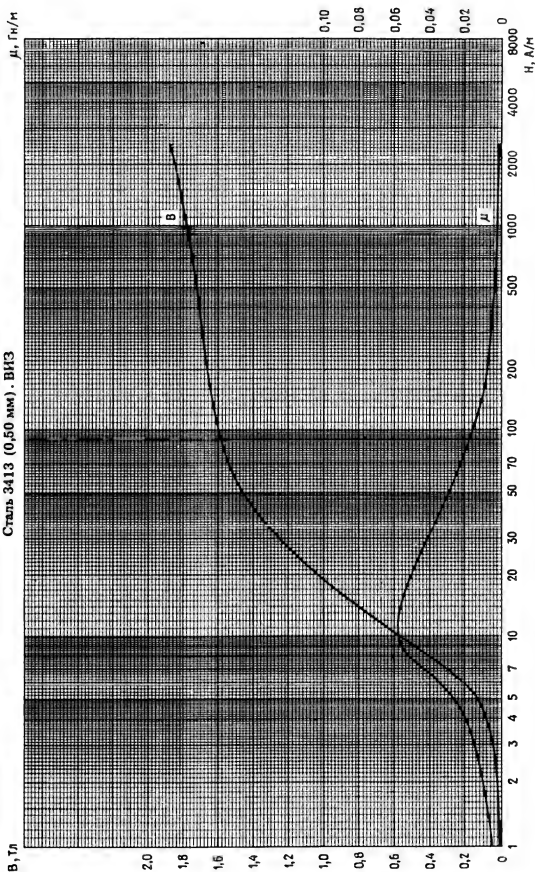


Сталь 3408 (0,30 мм) . НЛМК

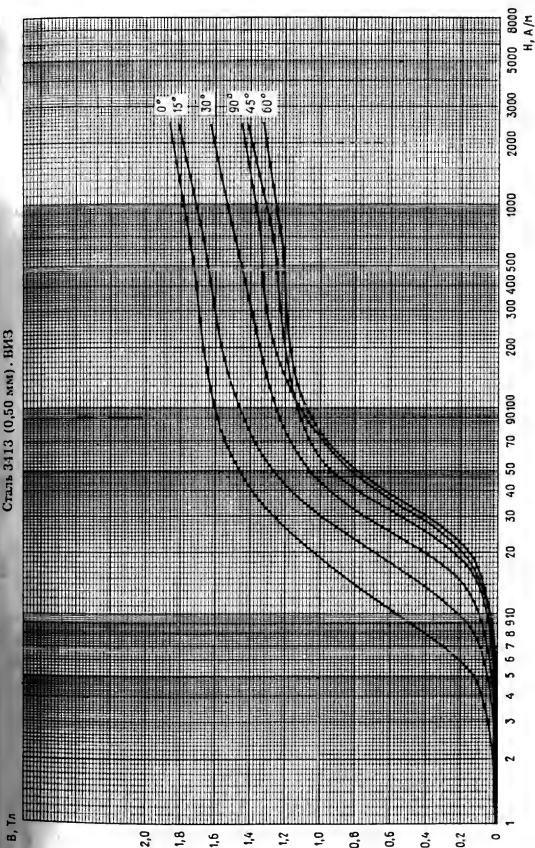




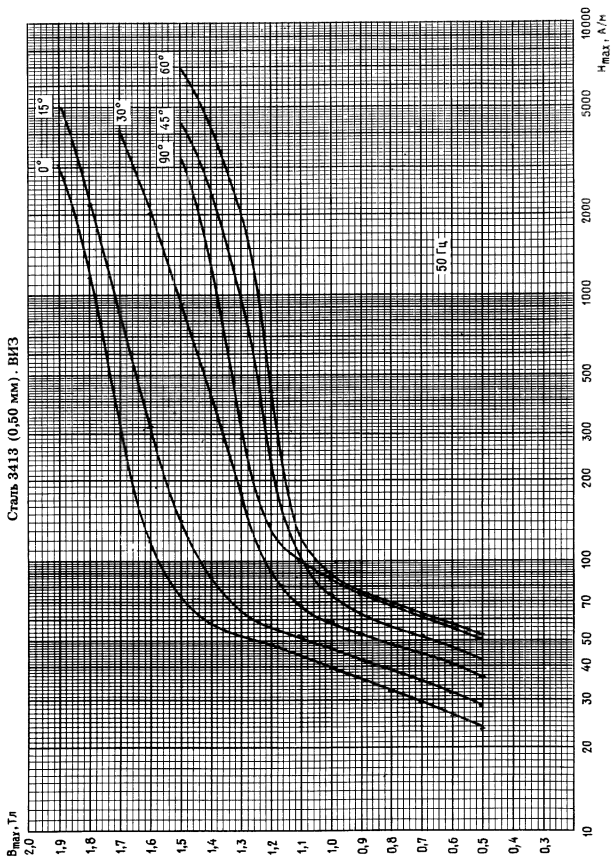
Сталь 3413 (0,50 мм) · ВИЗ



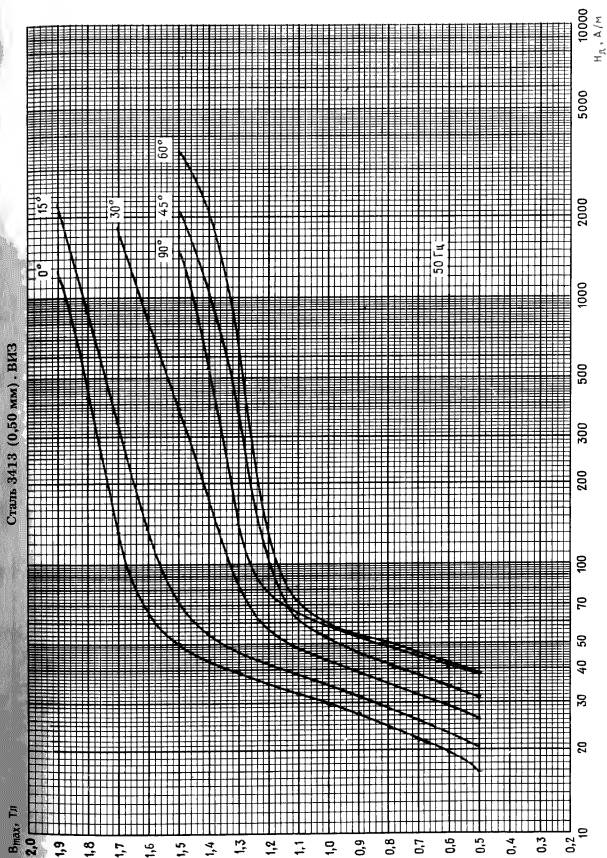
Сталь 3413 (0,50 мм) . ВКЗ

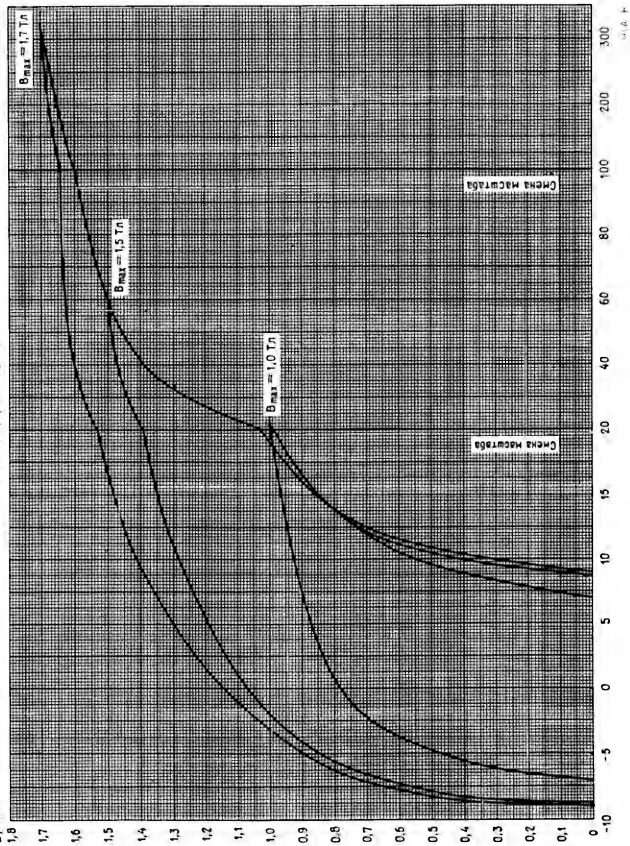


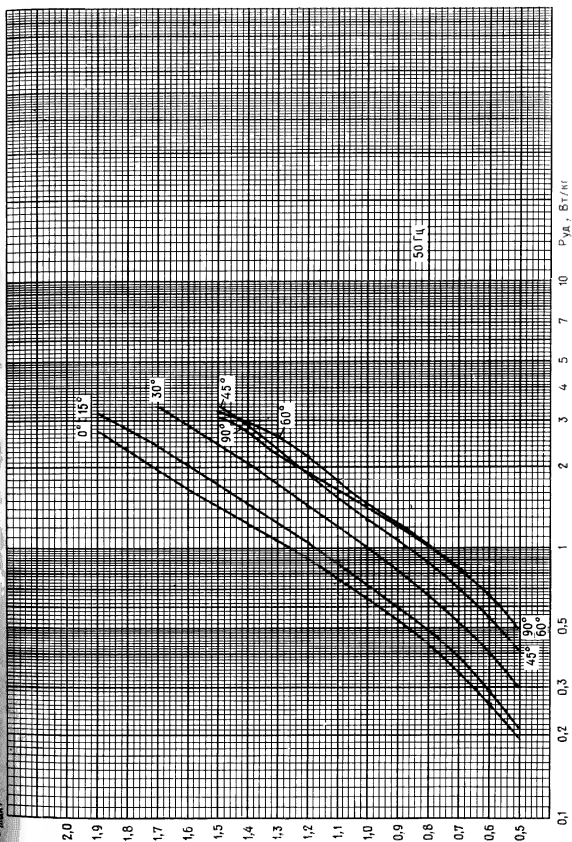
Сталь 3413 (0,50 мм) . ВИЗ



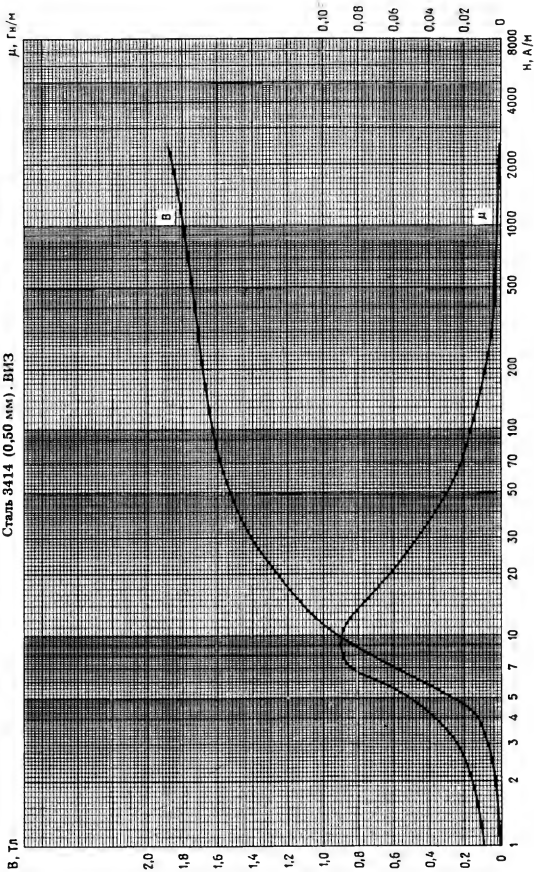
Сталь 3413 (0,50 мм) . ВКЗ



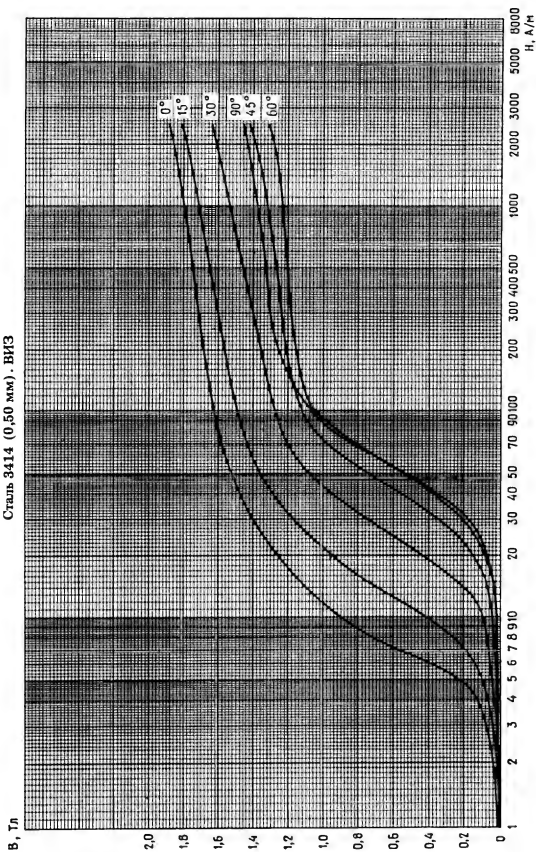




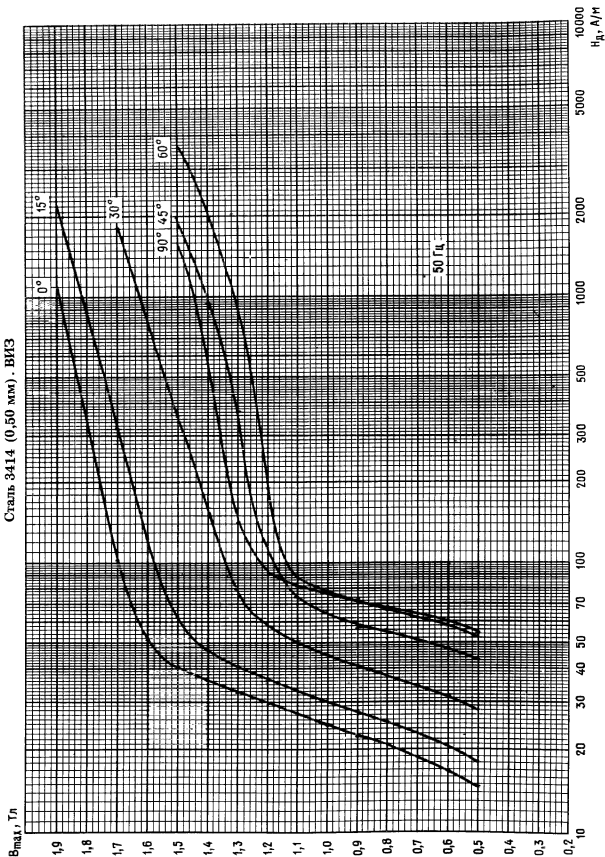
Сталь 3414 (0,50 мм) . ВНЗ



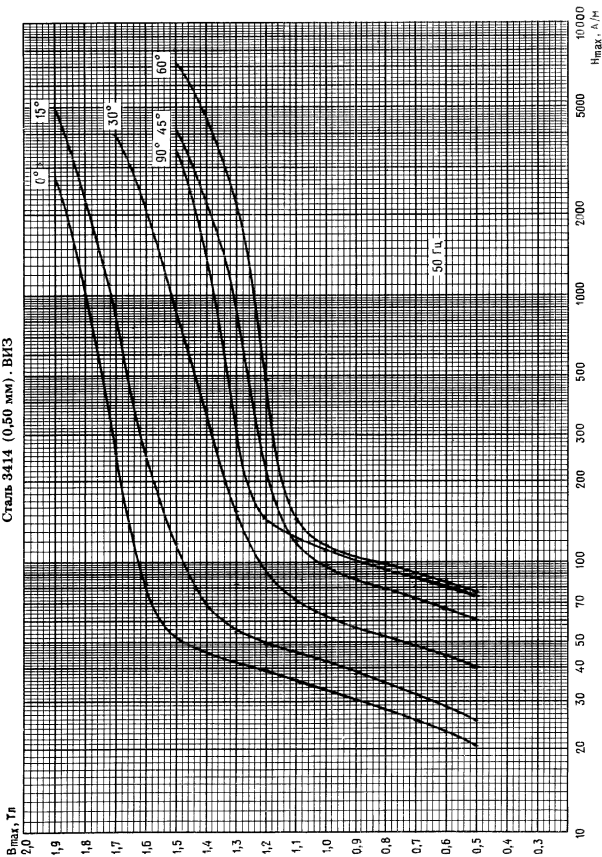
Сталь 3414 (0,50 мм) . ВИЗ



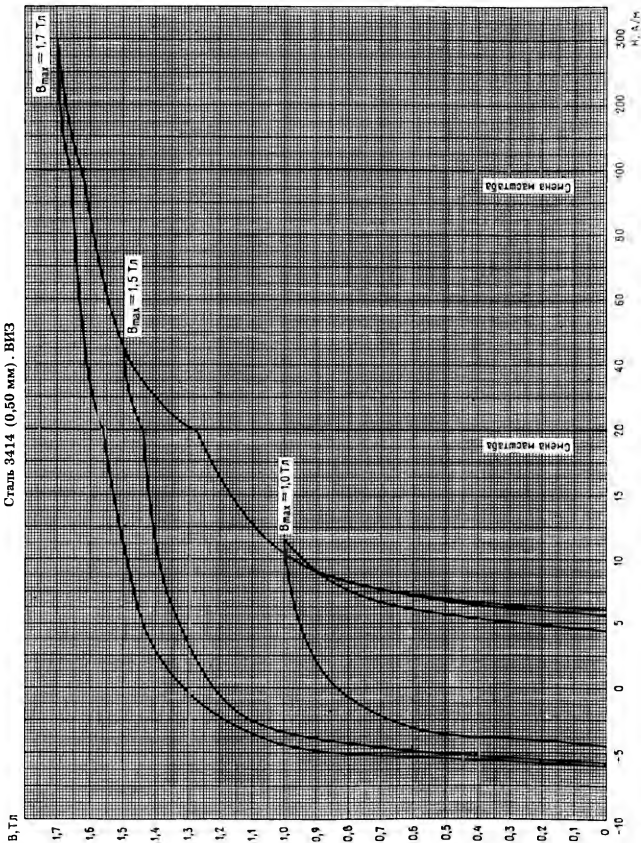
Сталь 3414 (0,50 мм) . ВИЗ



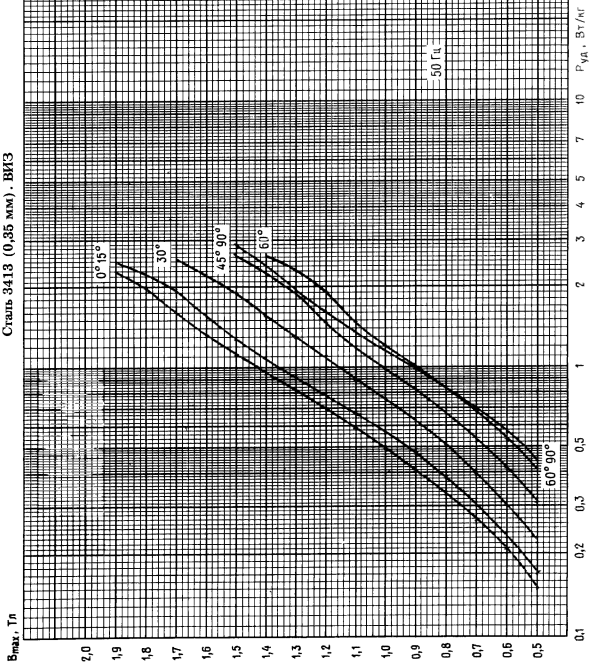
Сталь 3414 (0,50 мм). ВИЗ



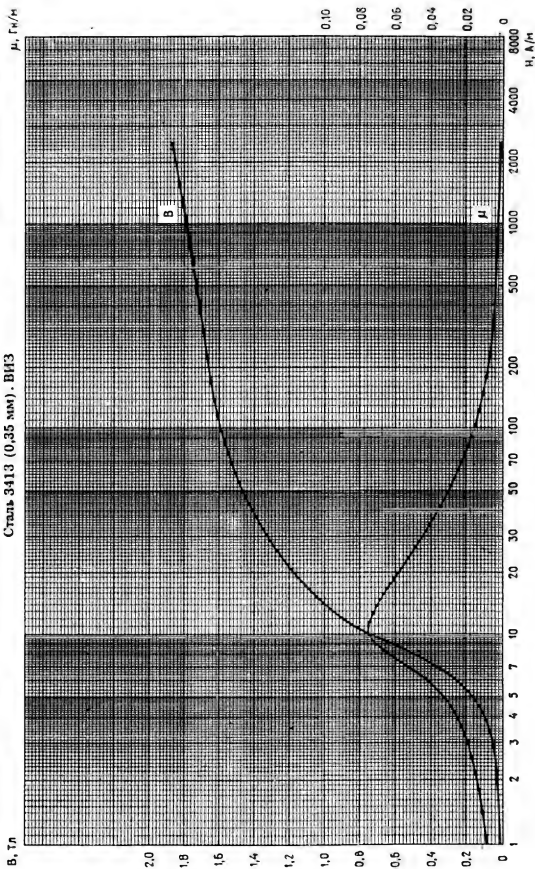
Сталь 3414 (0,50 мм) - ВИС



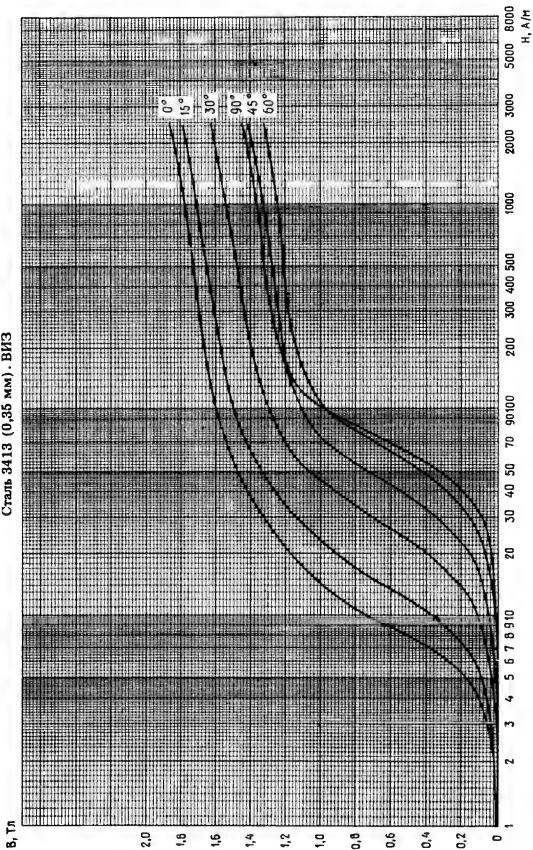
Сталь 3413 (0,35 мм) . ВИЗ



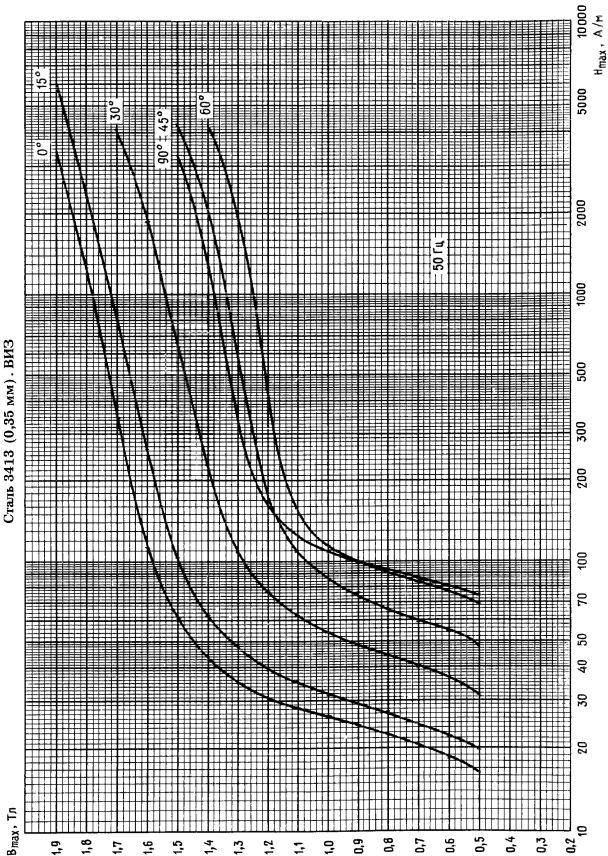
Сталь 3413 (0,35 мм) . ВИЗ



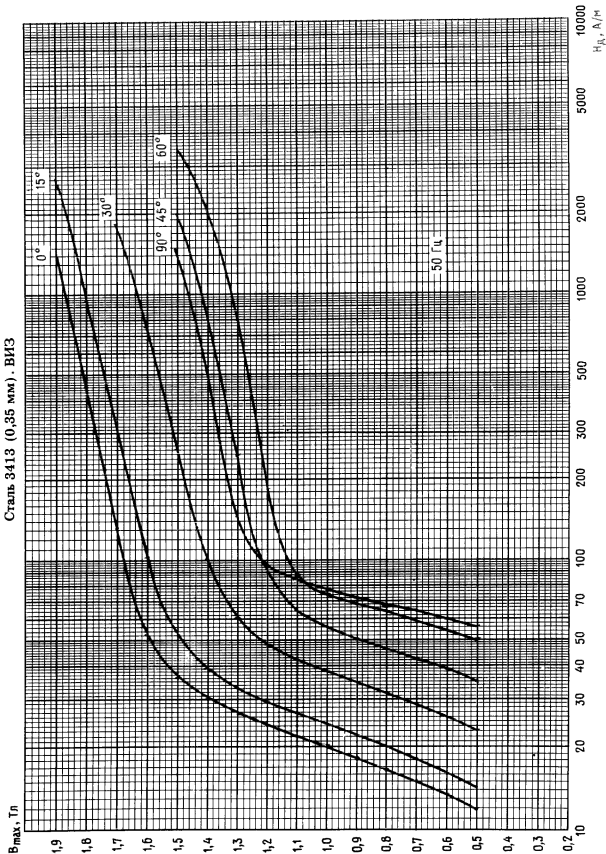
Сталь 3413 (0,35 мм) · ВИЗ



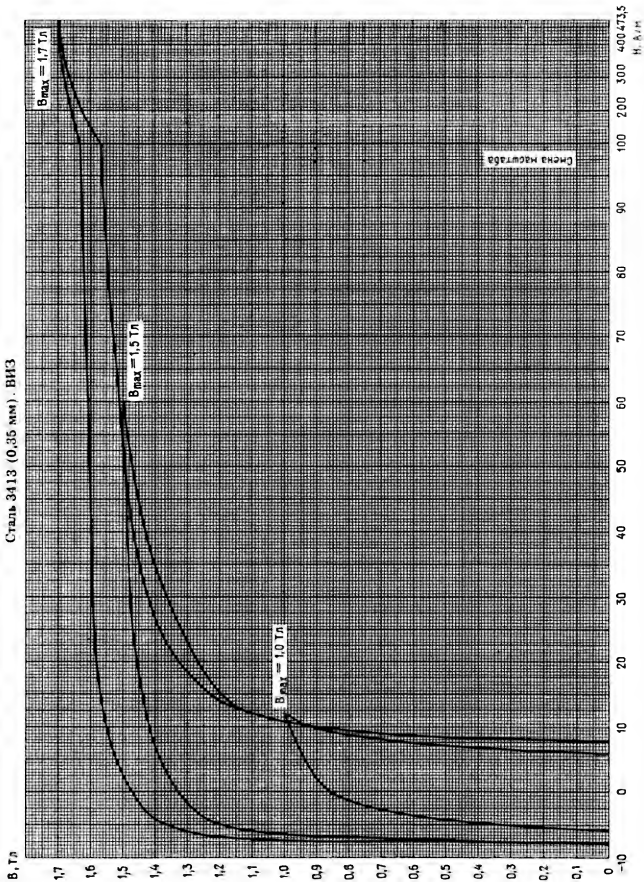
Сталь 3413 (0,35 мм). ВИЗ



Сталь 3413 (0,35 мм) . ВИЗ

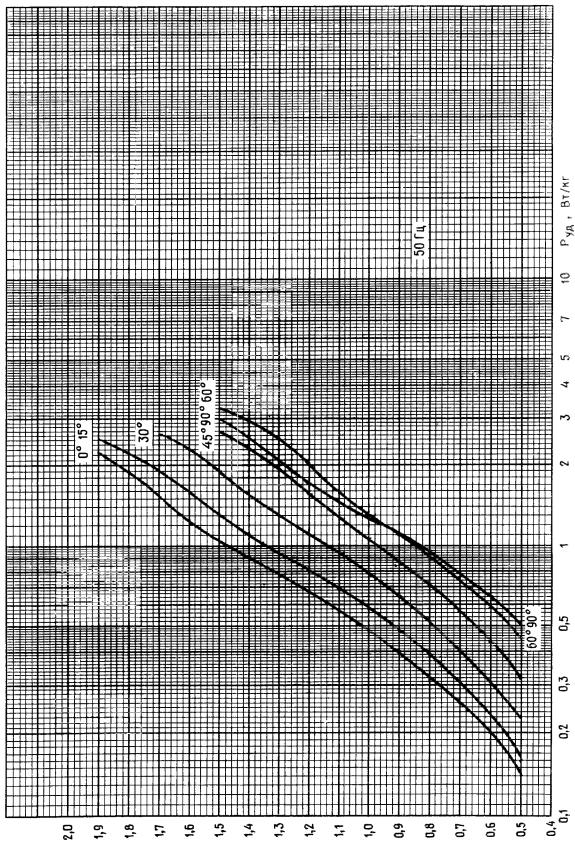


Сталь 3413 (0,35 мм) . ВНИЗ

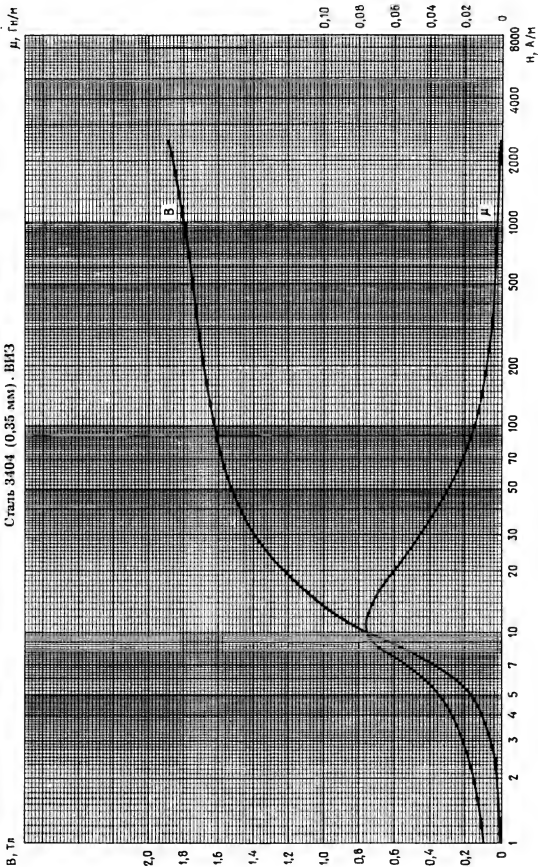


Сталь 3404 (0,35 мм) · ВИЗ

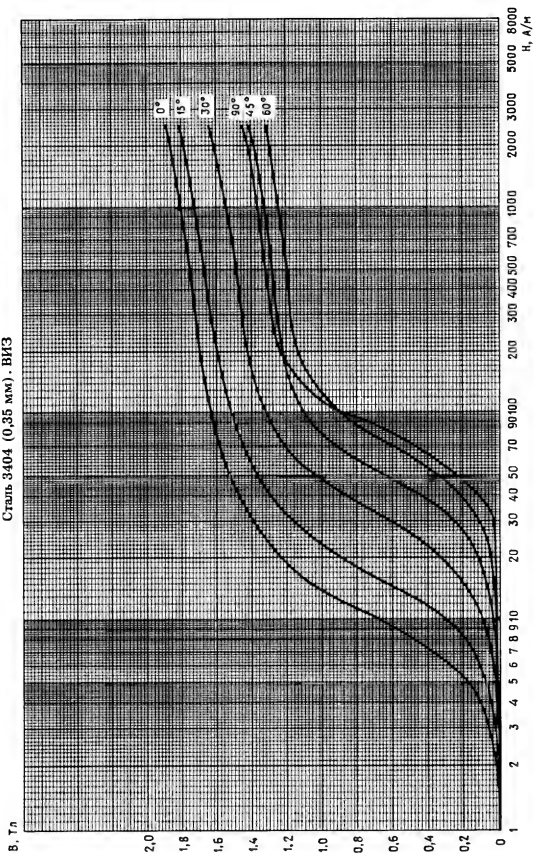
Втах, Тл



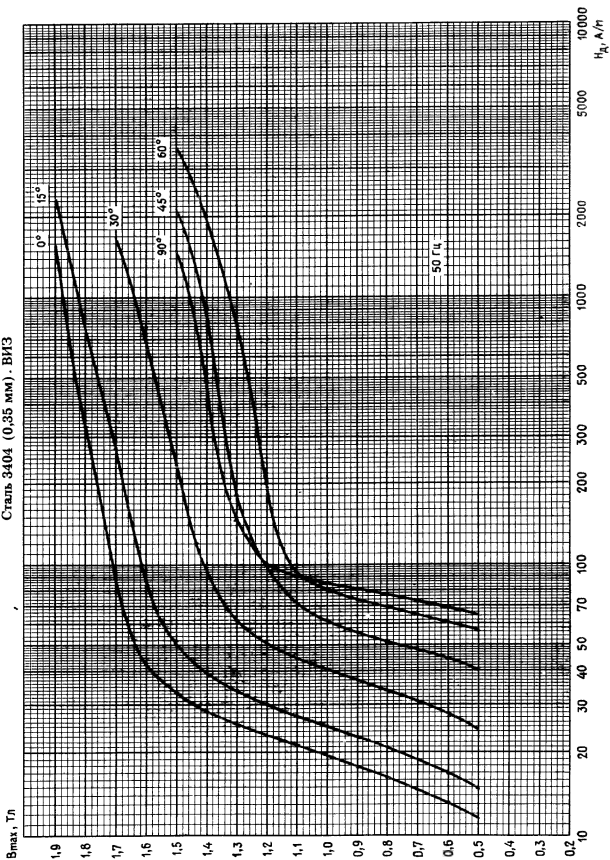
Сталь 3404 (0,35 mm) . ВКЗ



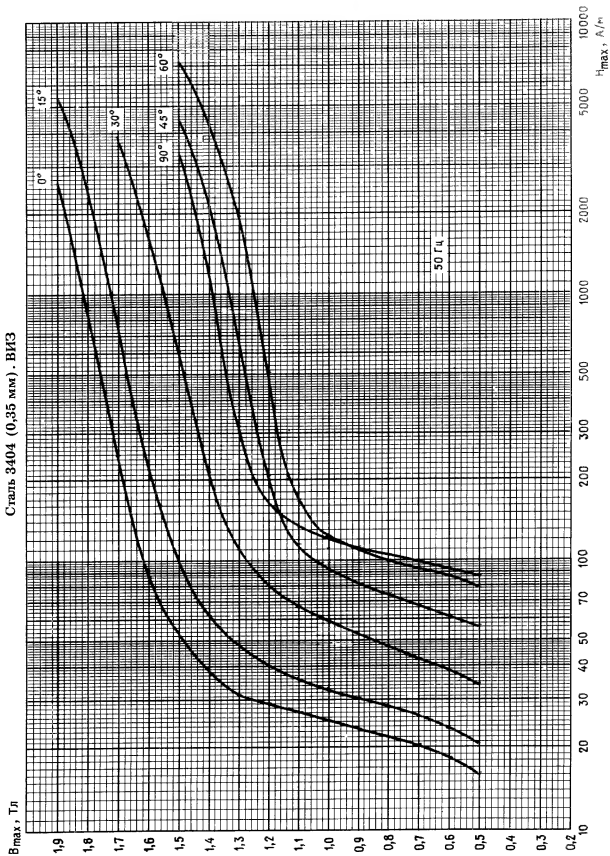
Сталь 3404 (0,35 мм) · ВИЗ

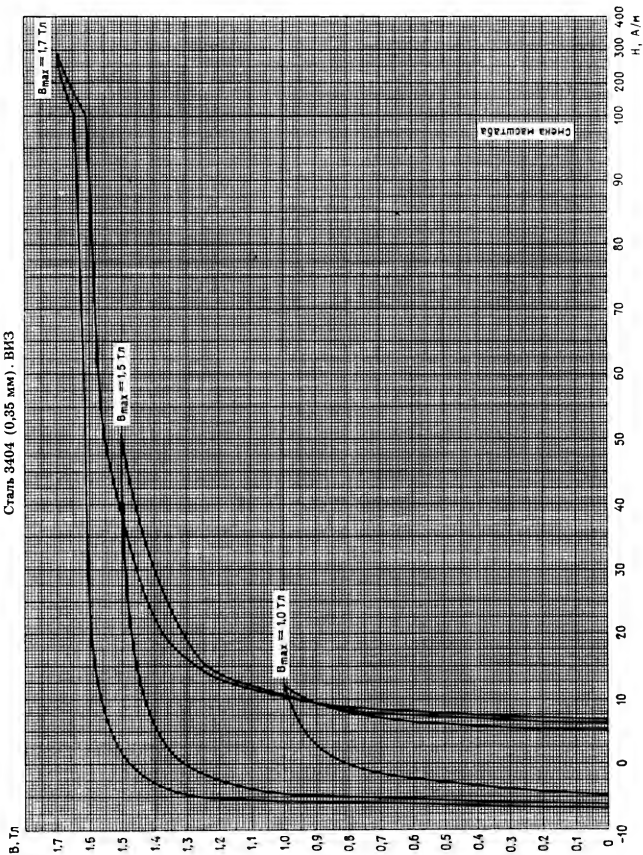


Сталь 3404 (0,35 мм) . ВИЗ

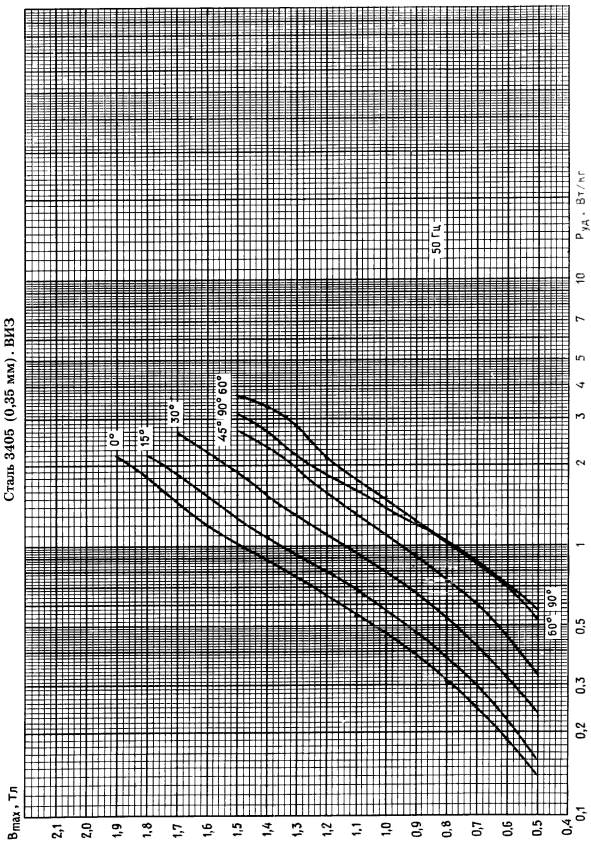


Сталь 3404 (0,35 мм) . ВИЗ

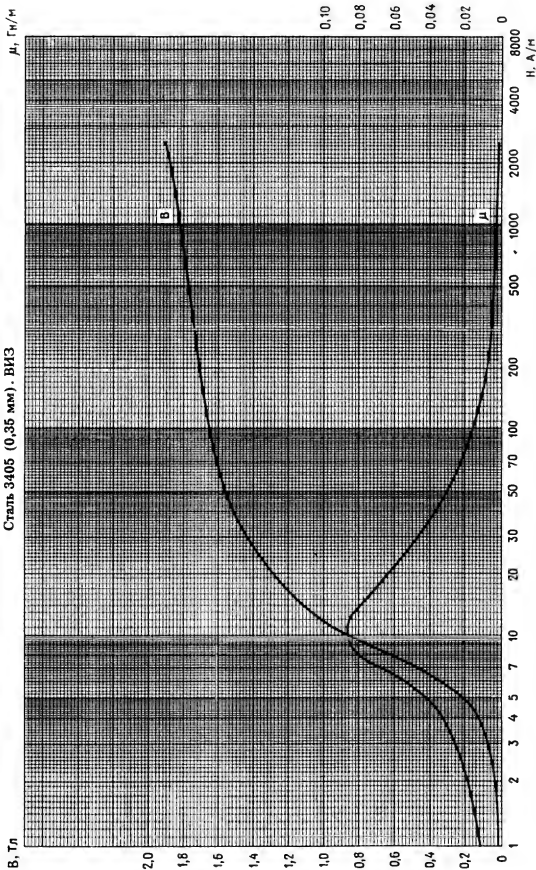




Сталь 3405 (0,35 мм) . ВИС

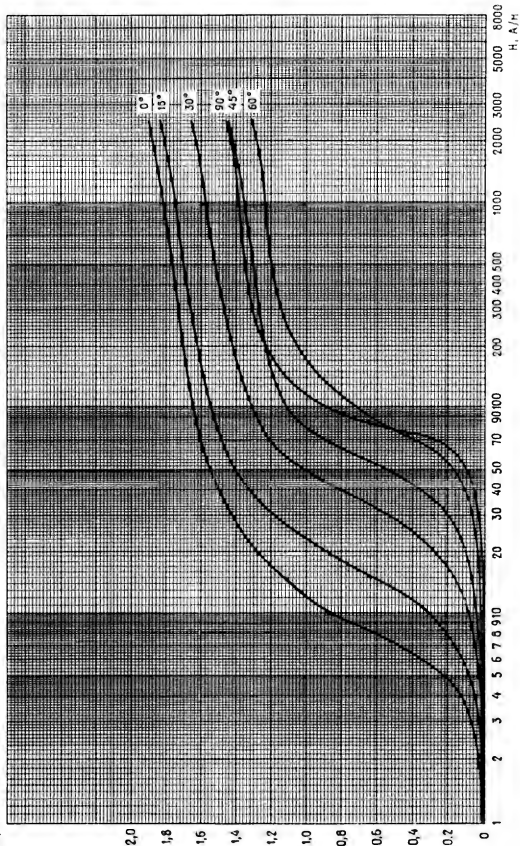


Сталь 3405 (0,35 мм) - ВИЗ

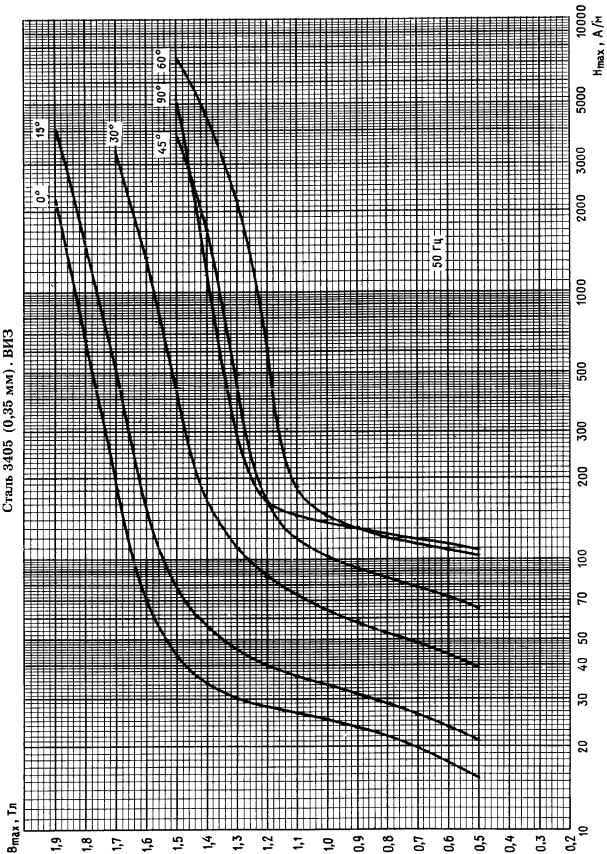


Сталь 3405 (0,35 мм) . Виз

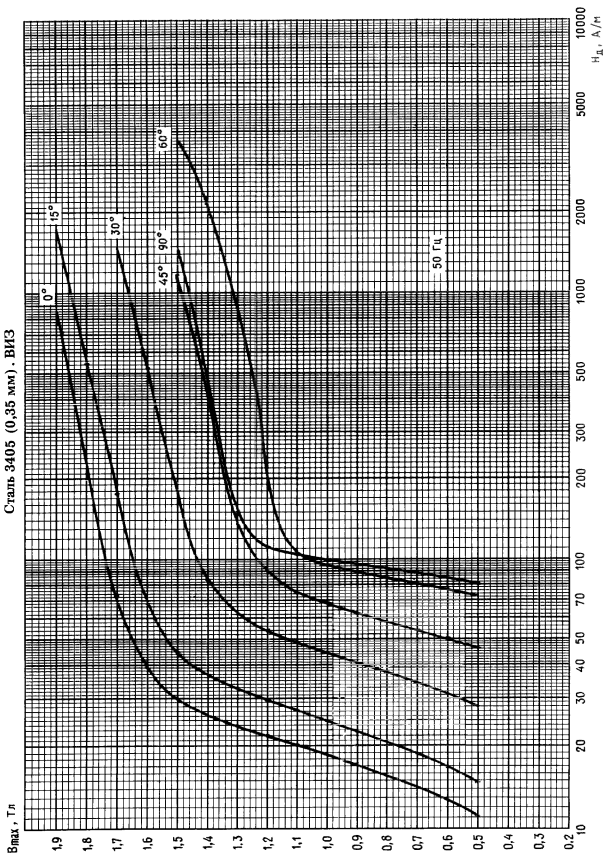
В, тл



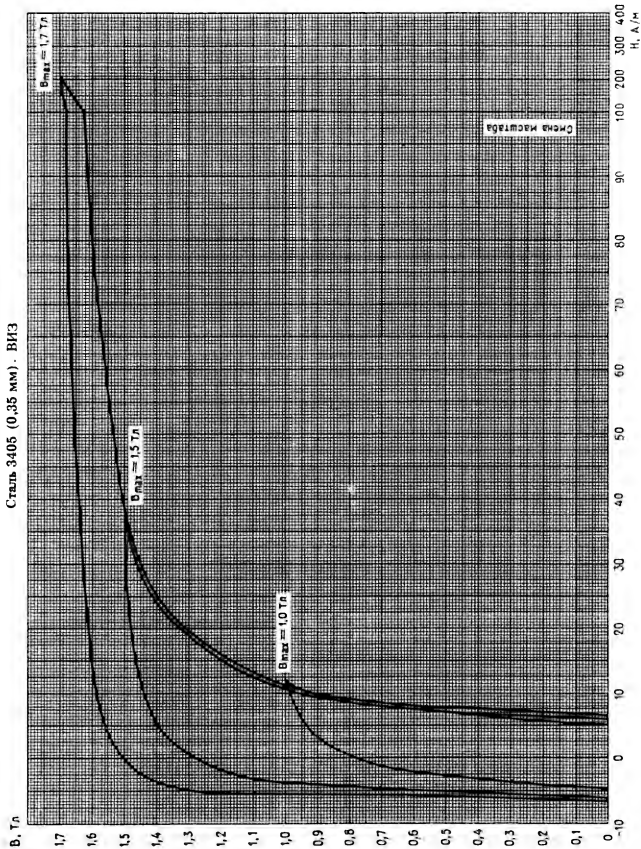
Сталь 3405 (0,35 мм) . ВИЗ



Сталь 3405 (0,35 мм) . ВИЗ

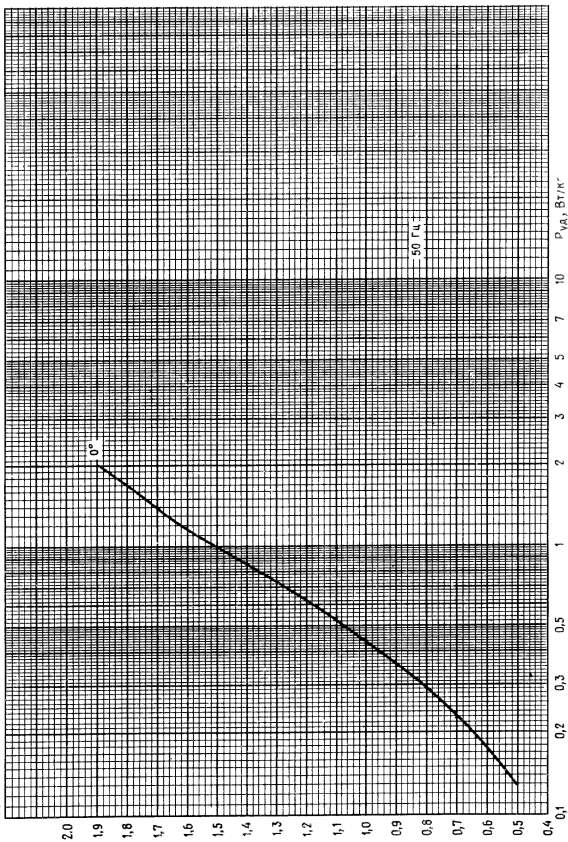


Сталь 3405 (0,35 мм) . ВИЗ



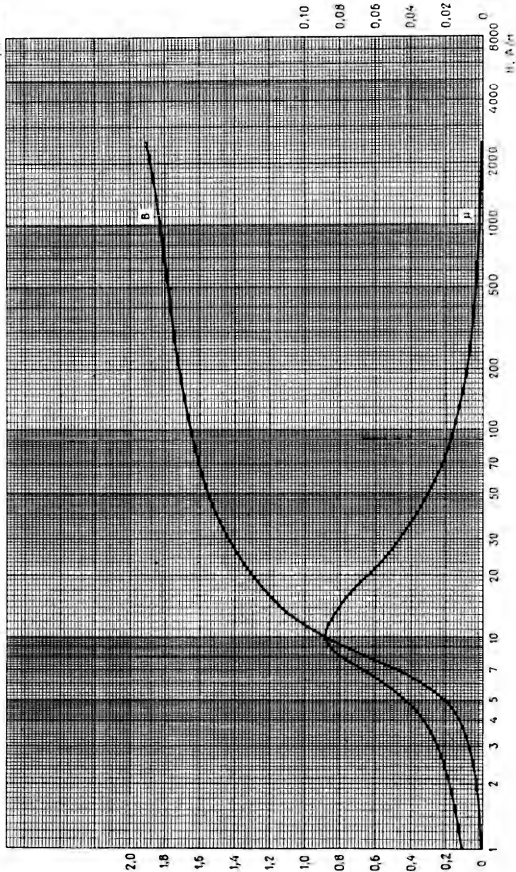
Сталь 3406 (0,35 мм). ВИЗ

V_{max}, T_n

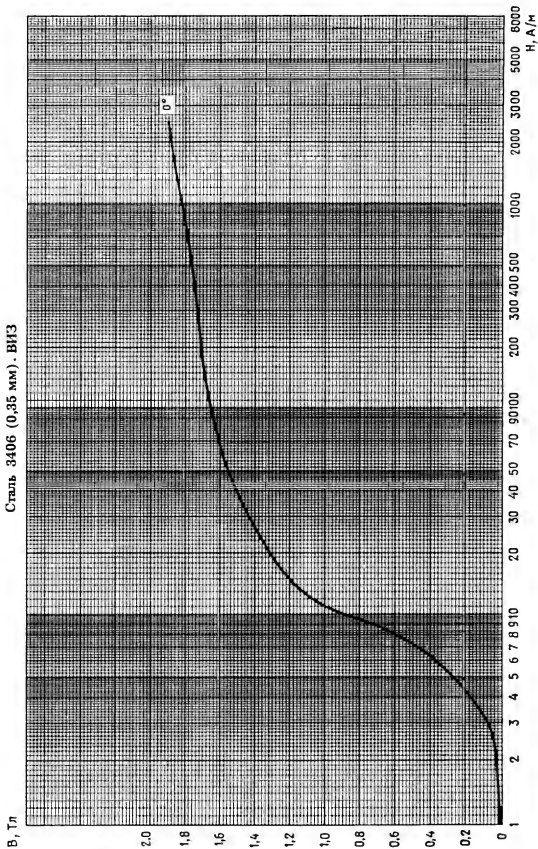


В, Тл

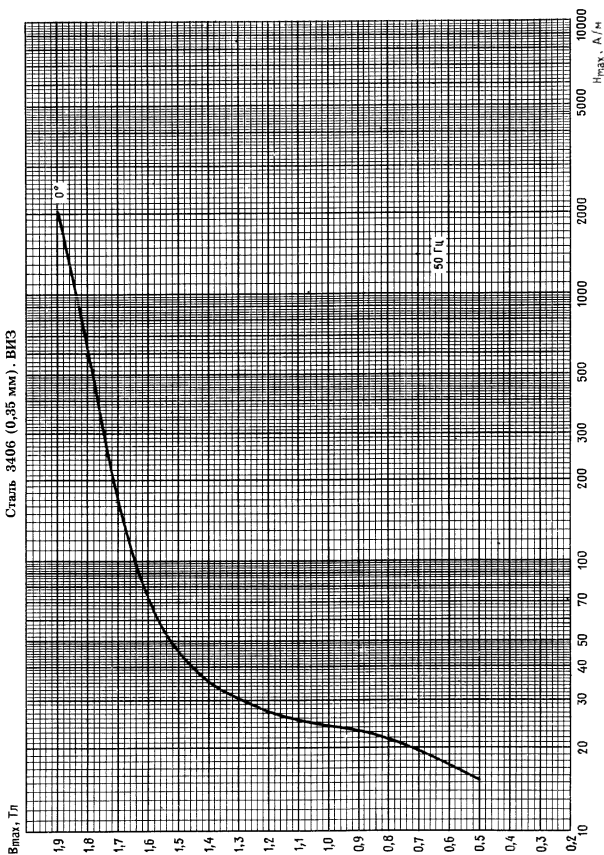
Сталь 3406 (0,35 мм). В13

 $\mu, \Gamma_{\text{н/м}}$ 

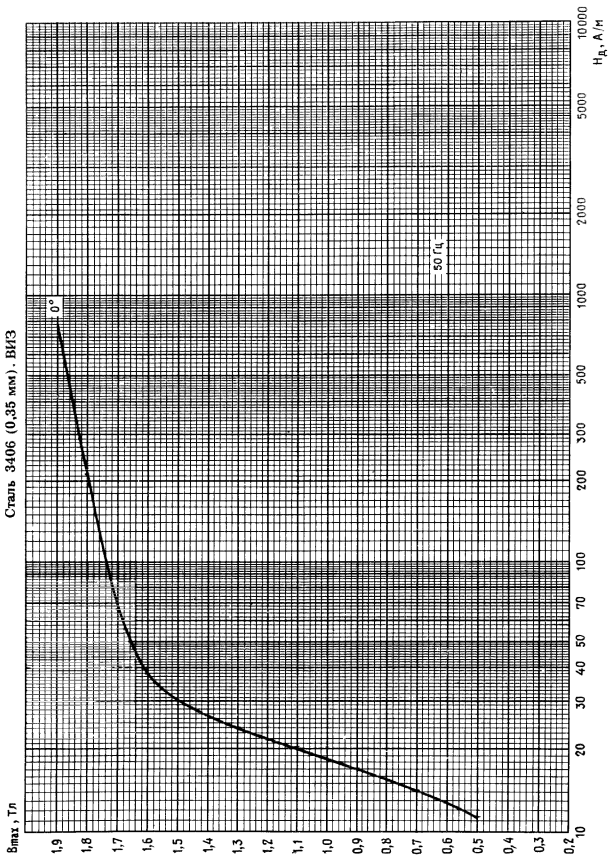
Сталь 3406 (0,35 мм) . ВЛЗ



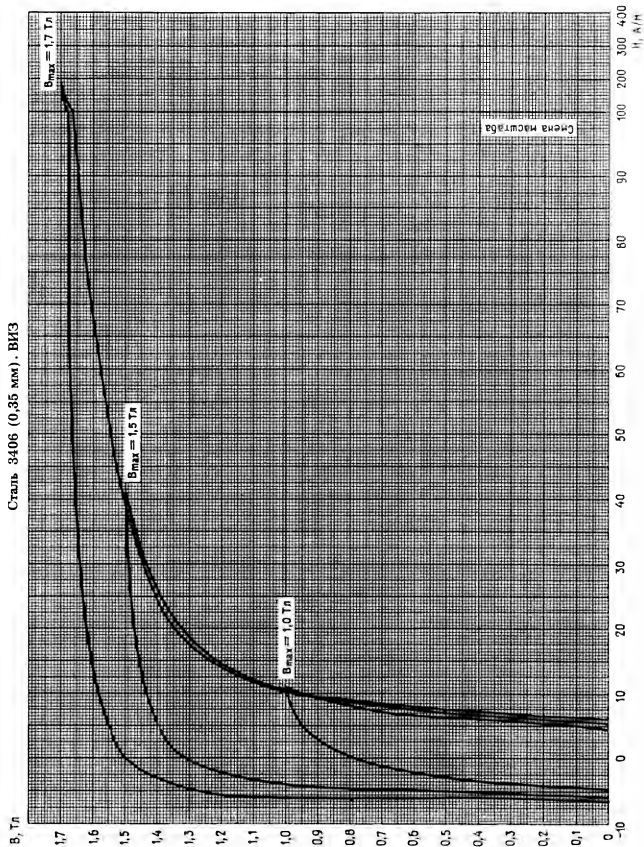
Сталь 3406 (0,35 мм) . ВИЗ



Сталь 3406 (0,35 мм) . ВИЗ

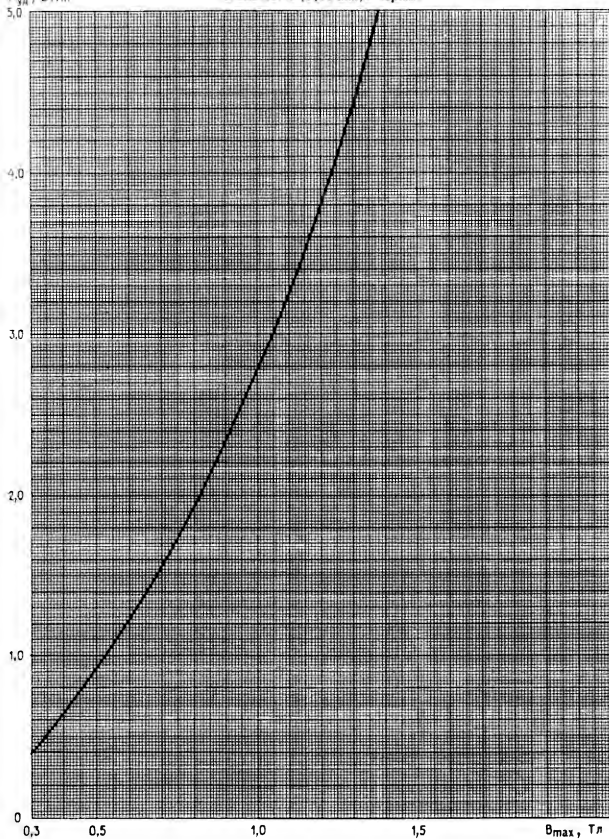


Сталь 3406 (0,35 мм). ВИЗ



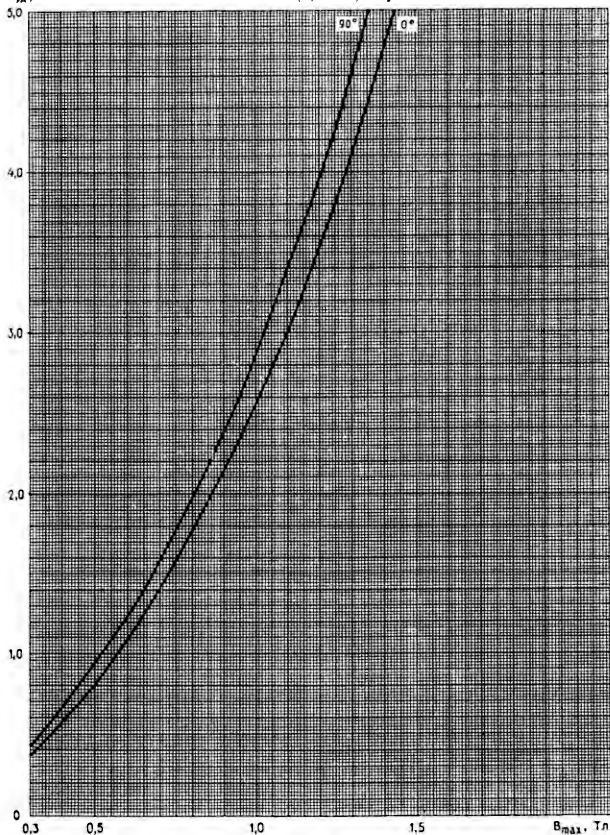
$P_{уд}, \text{ Вт/кг}$

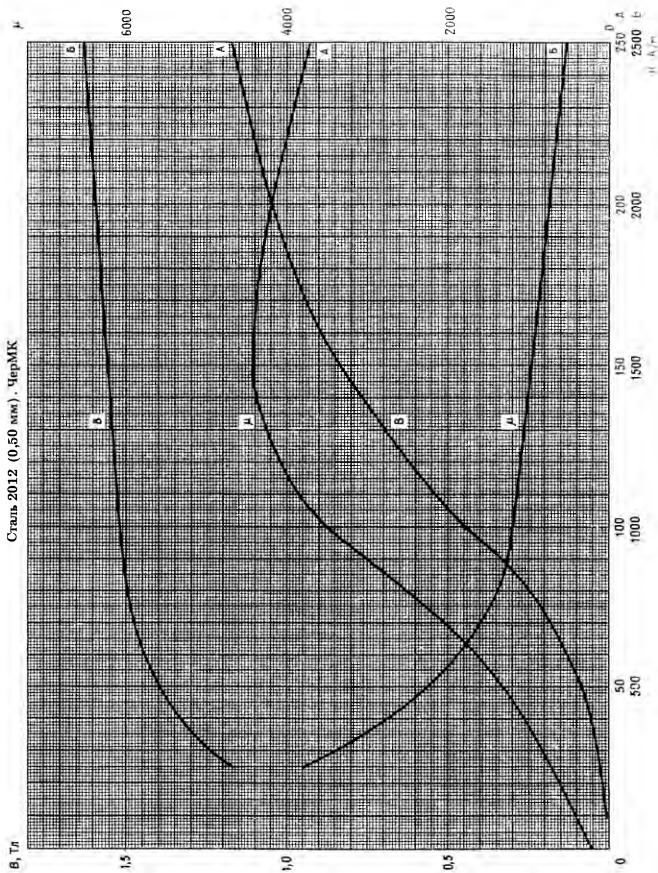
Сталь 2012 (0,50 мм) . ЧерМК

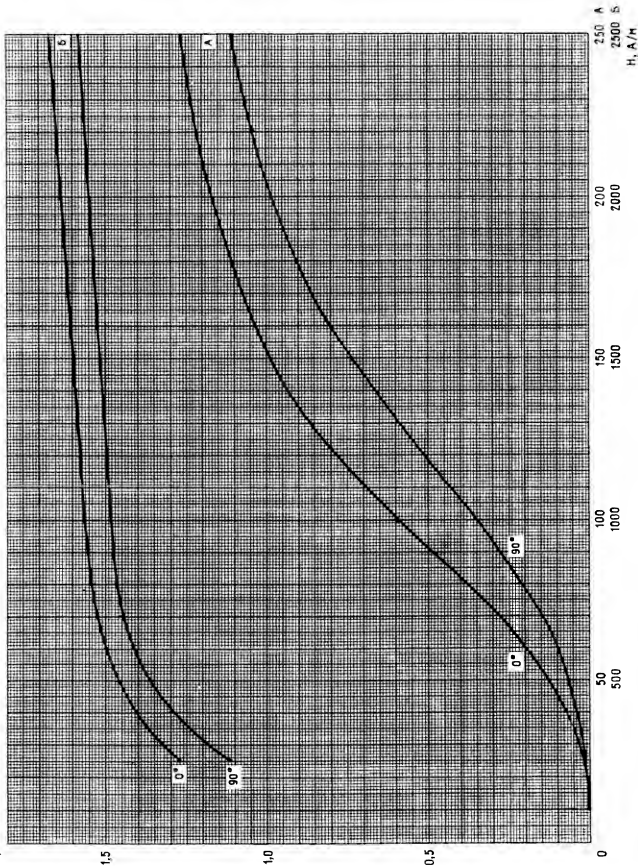


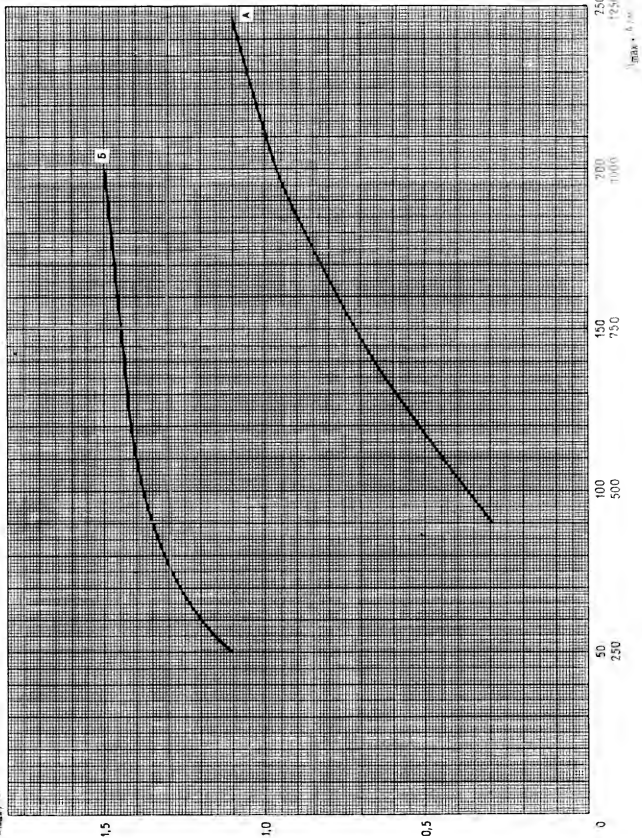
$R_{уд}$, Вт/кг

Сталь 2012 (0,50 мм) . ЧерМК

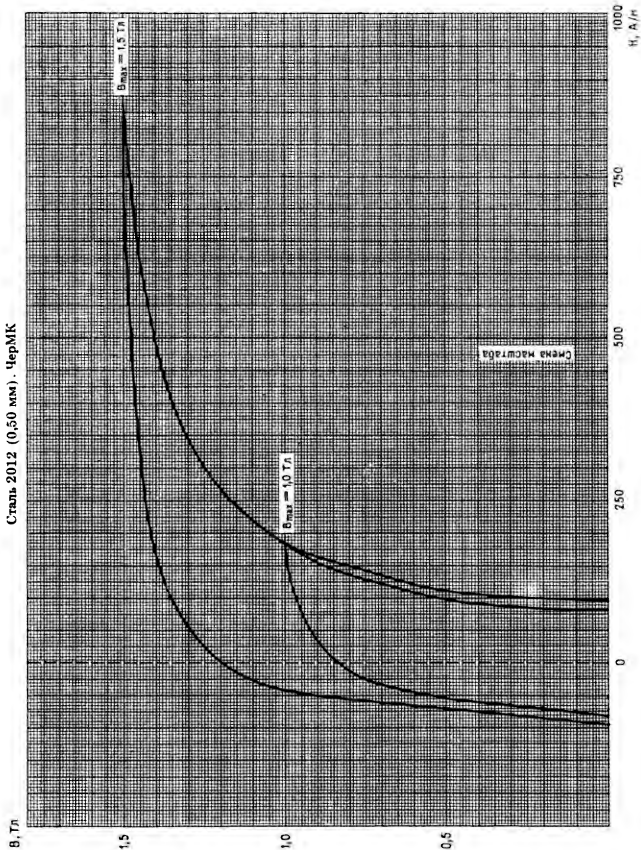






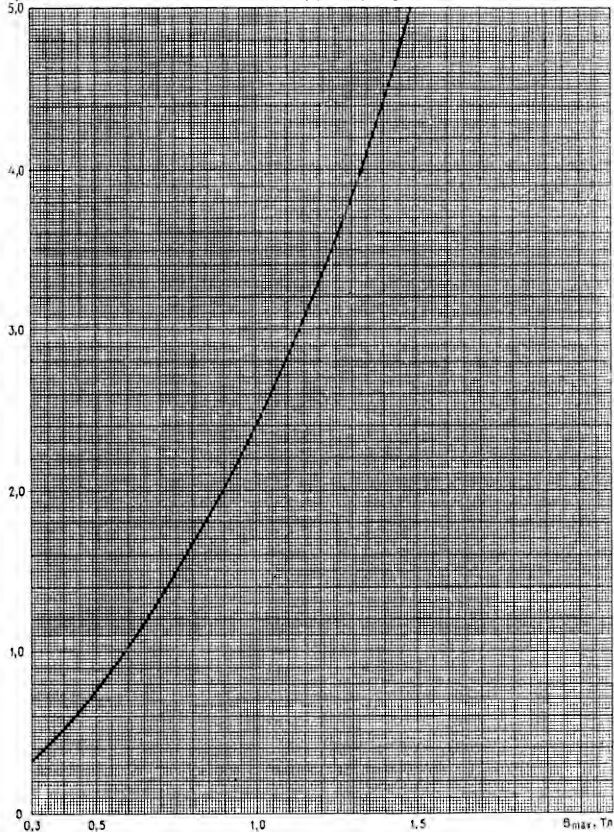


Сталь 2012 (0,50 мм) . ЧерМК



$R_{уд}, \text{Вт/кг}$
5,0

Сталь 2013 (0,50 мм) . ЧерМК



$P_{уд}$, Вт/кг

Сталь 2013 (0,50 мм). ЧерМК

5,0

4,0

3,0

2,0

1,0

0

0,3

0,5

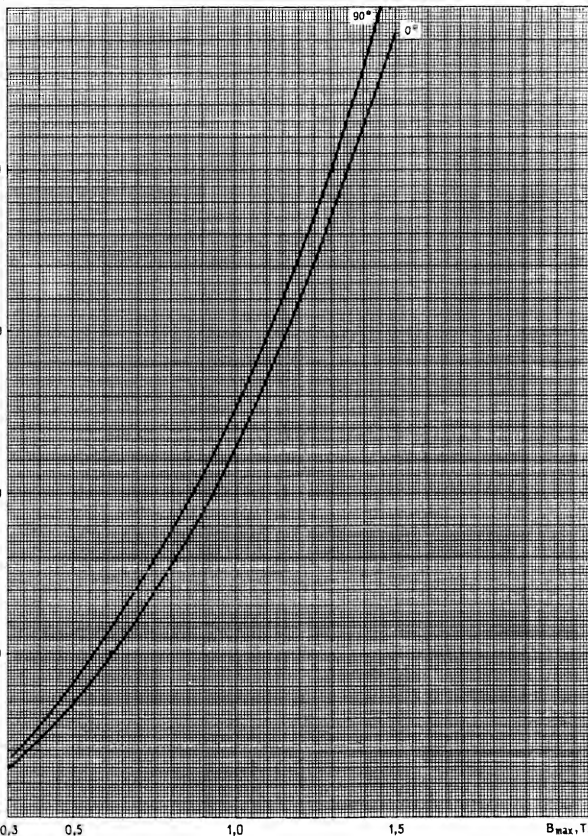
1,0

1,5

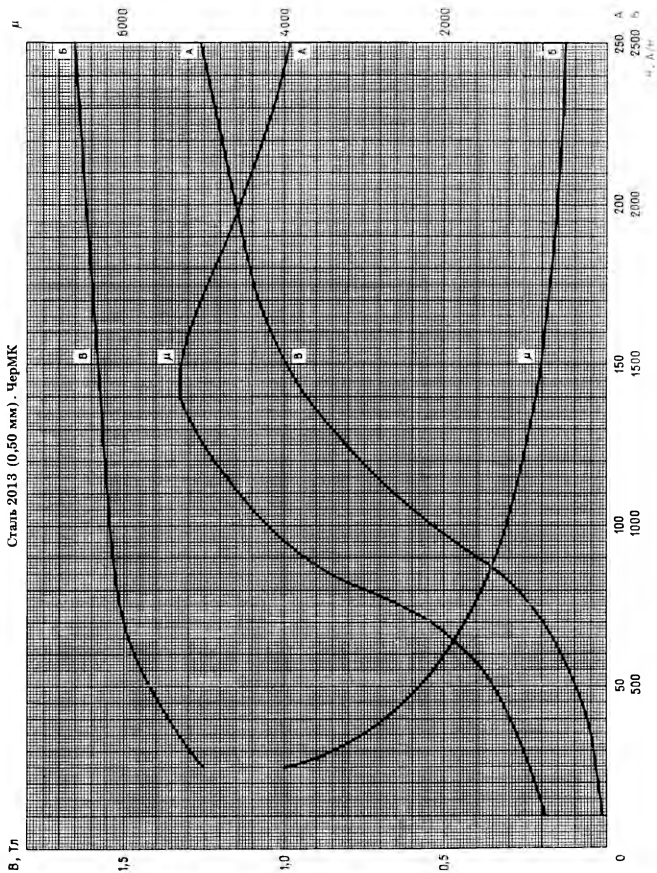
B_{max} , Тл

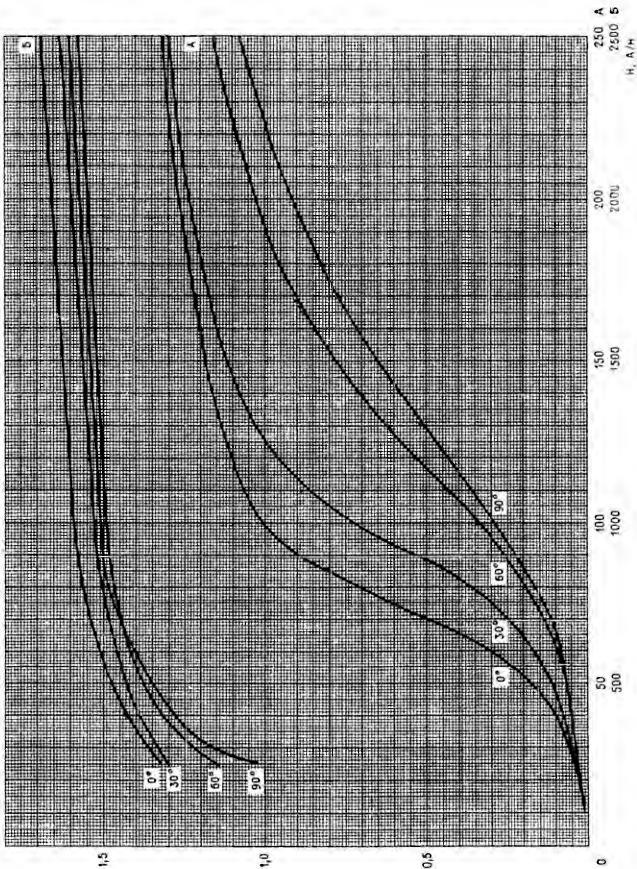
90°

0°



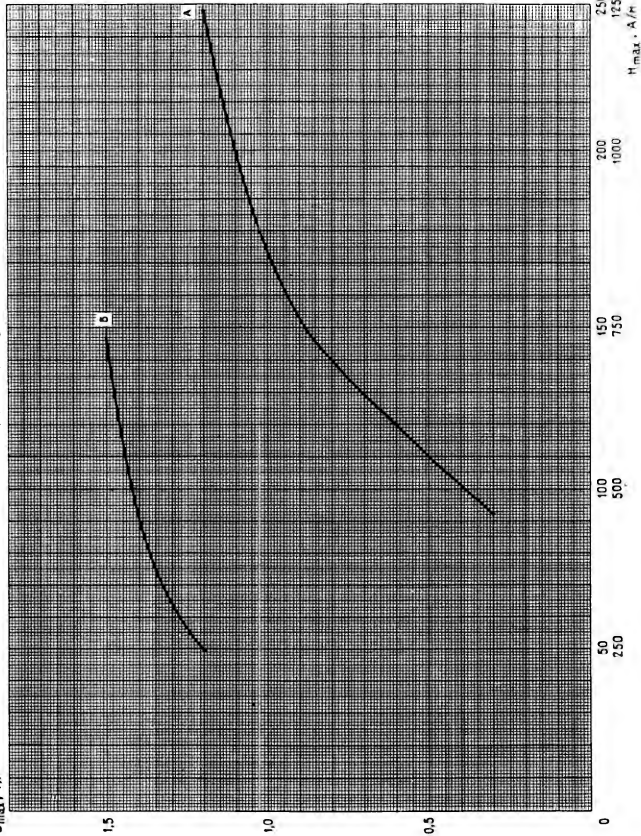
Сталь 2013 (0,50 мм). ЧерМК

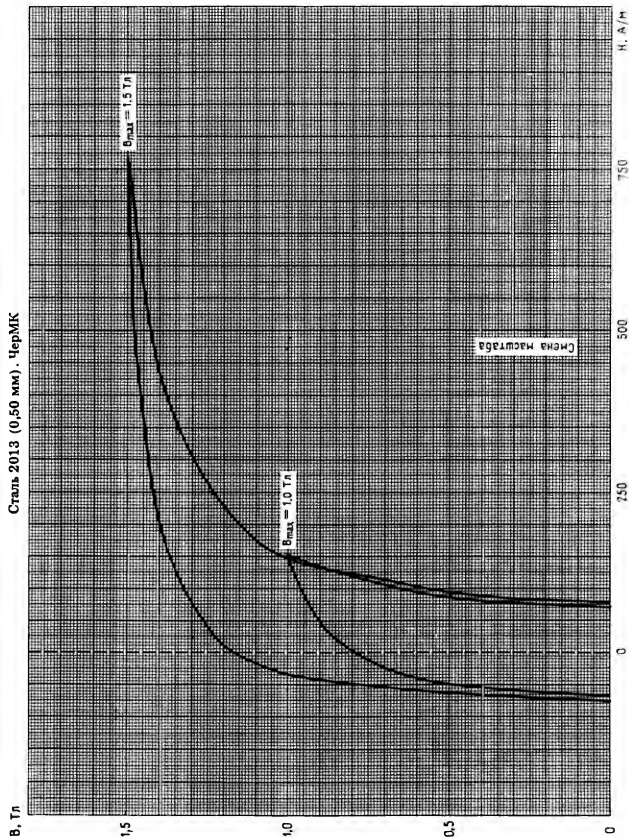




Сталь 2013 (0,50 мм) - ЧерМК

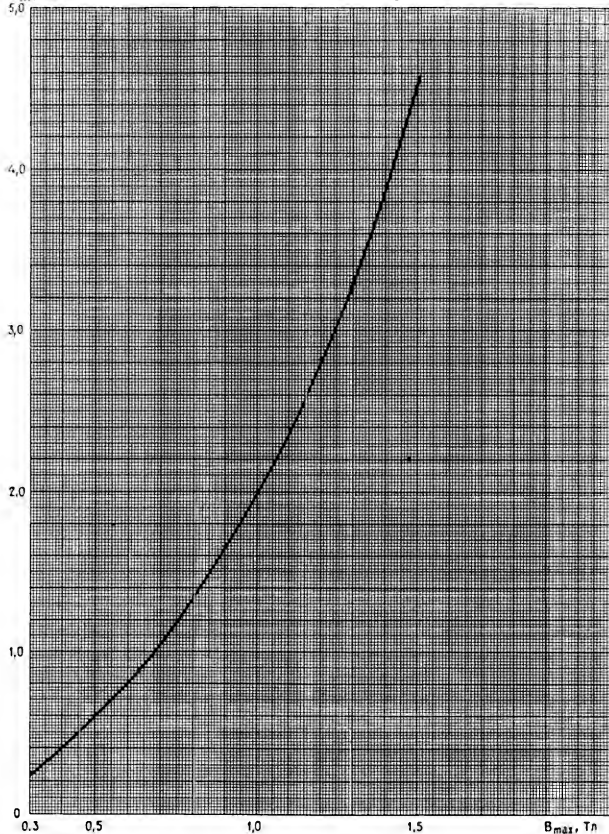
$\sigma_{\max}, \text{ГПа}$





$P_{уд}, \text{Вт/кг}$
5,0

Сталь 2211 (0,50 мм). ЧерМК



$P_{уд} \cdot B_T / \text{кг}$

Сталь 2211 (0,50 мм) . ЧерМК

5,0

4,0

3,0

2,0

1,0

0

0,3

0,5

1,0

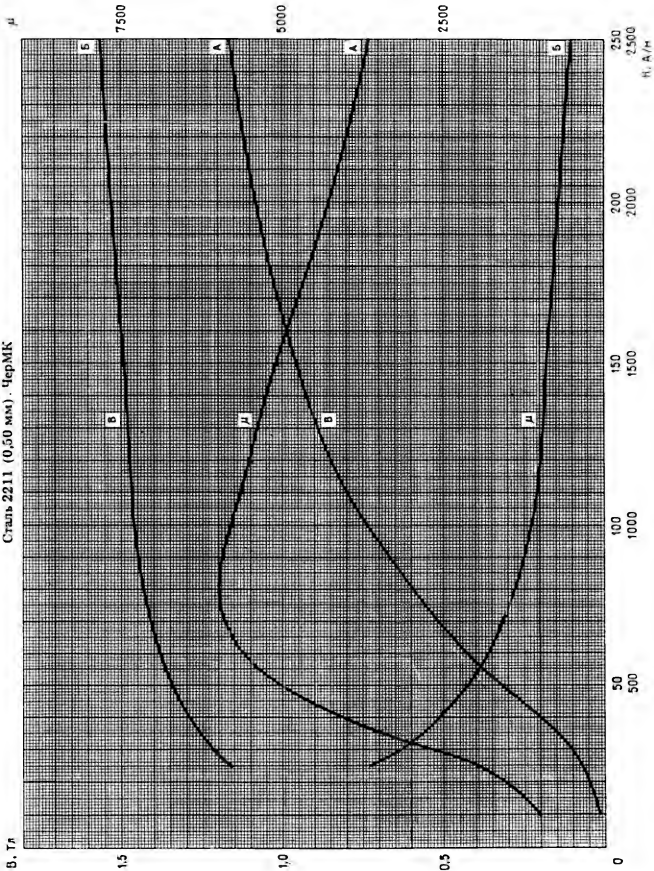
1,5

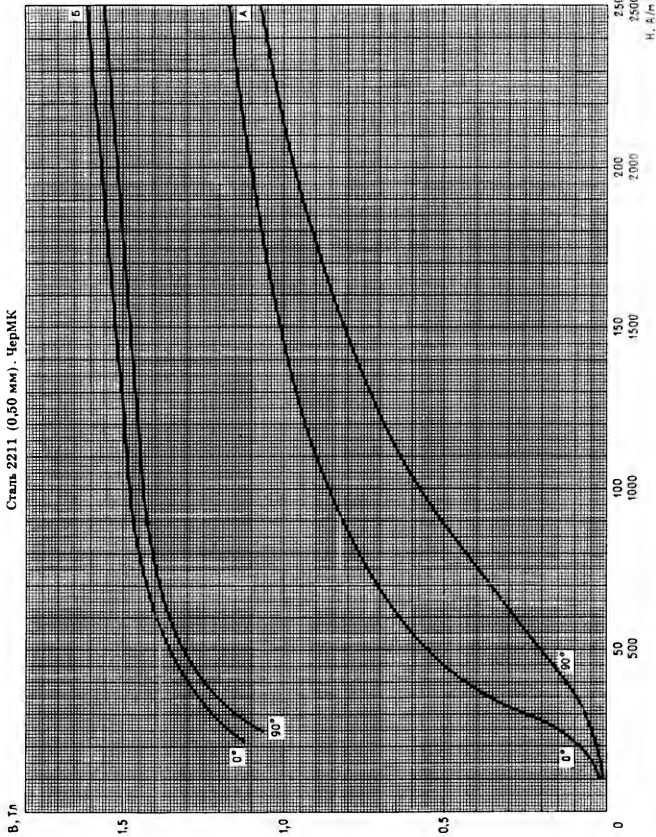
$B_{max} \cdot T_n$

90°

0°

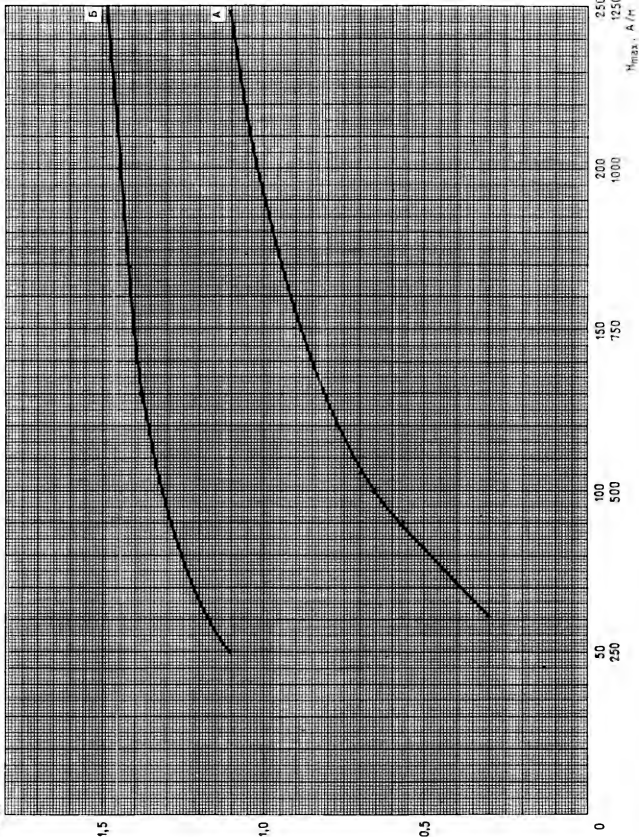
Сталь 2211 (0,50 мм) . ЧерМК

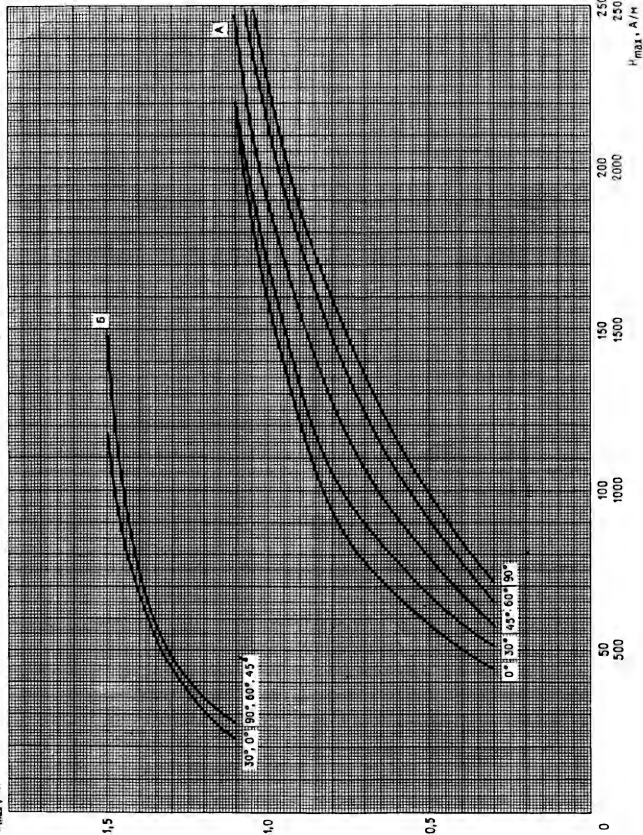


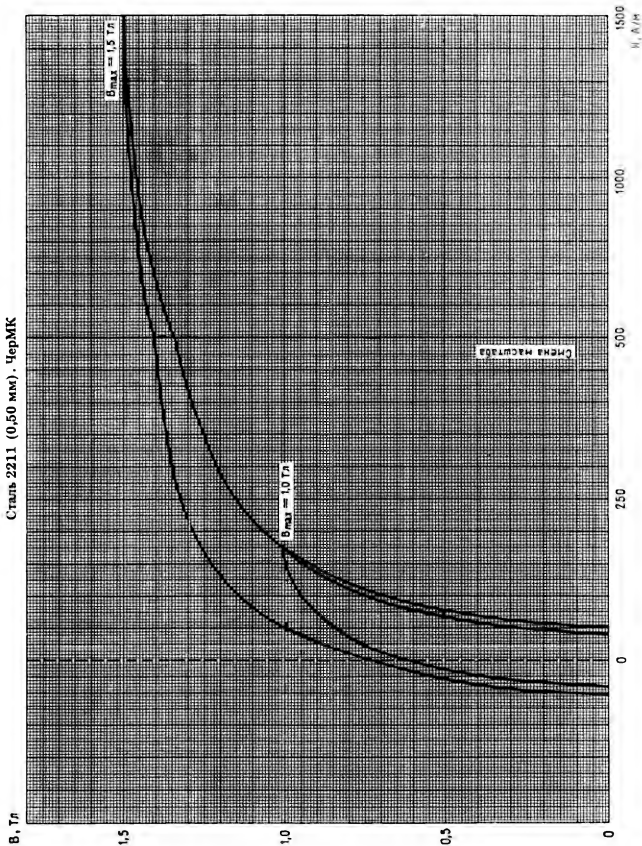


Сталь 2211 (0,50 мм). ЧерМК

$B_{max}, T/\mu$

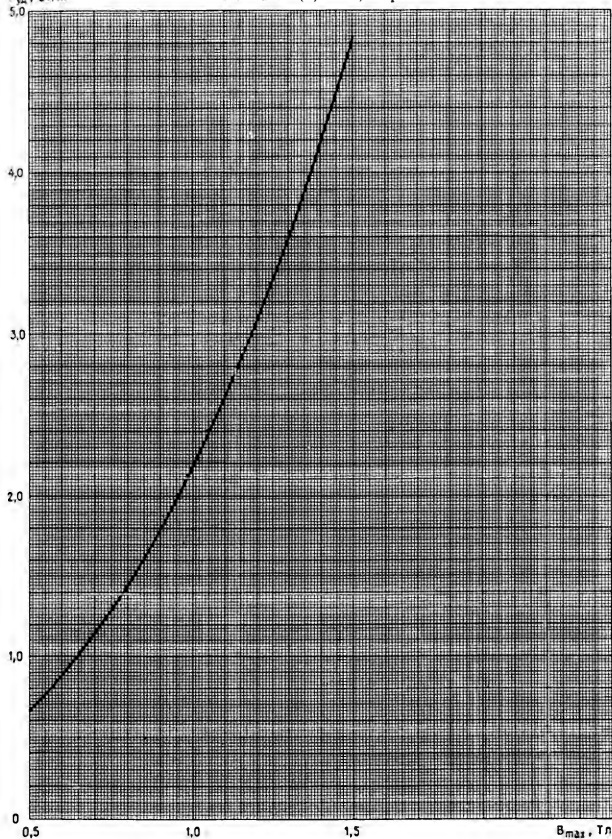






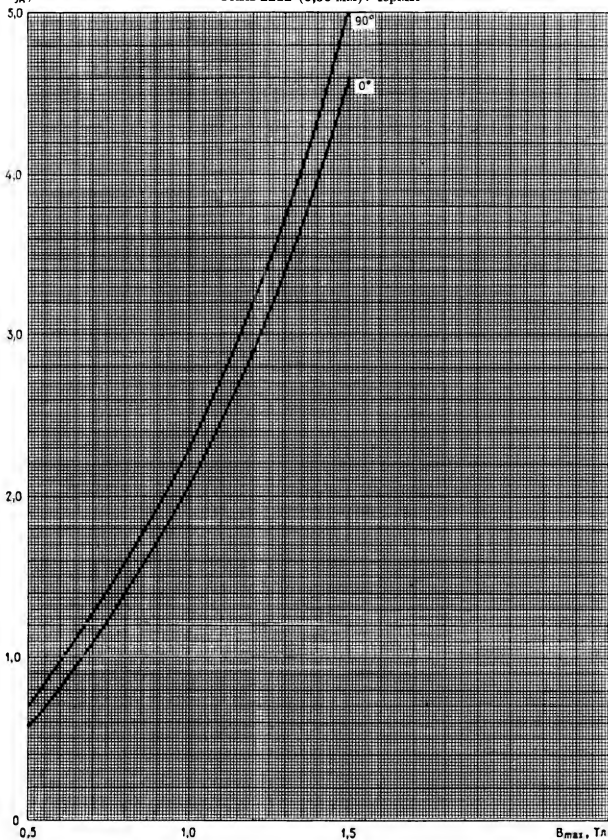
$P_{уд}$, Вт/кг

Сталь 2212 (0,50 мм). ЧерМК

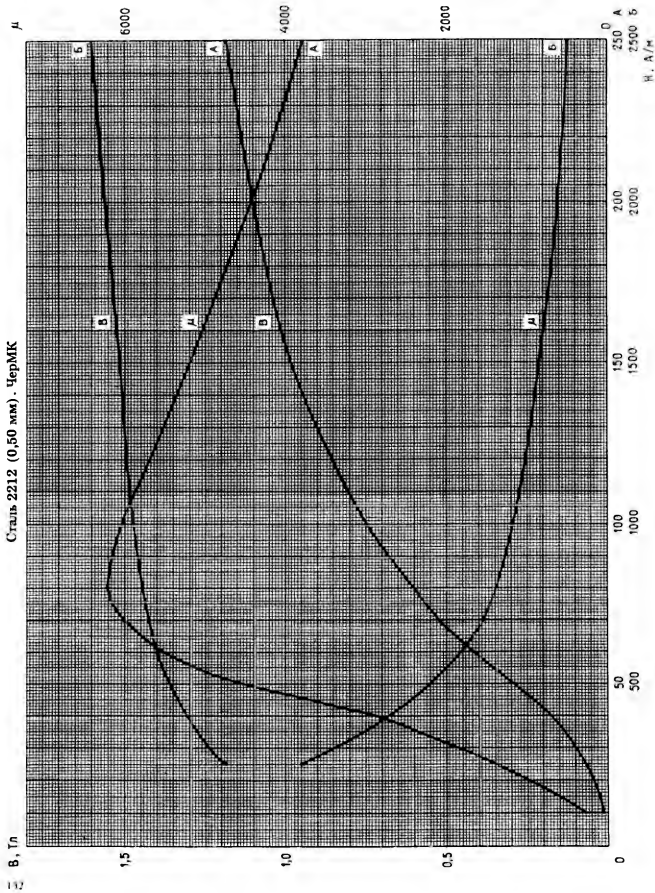


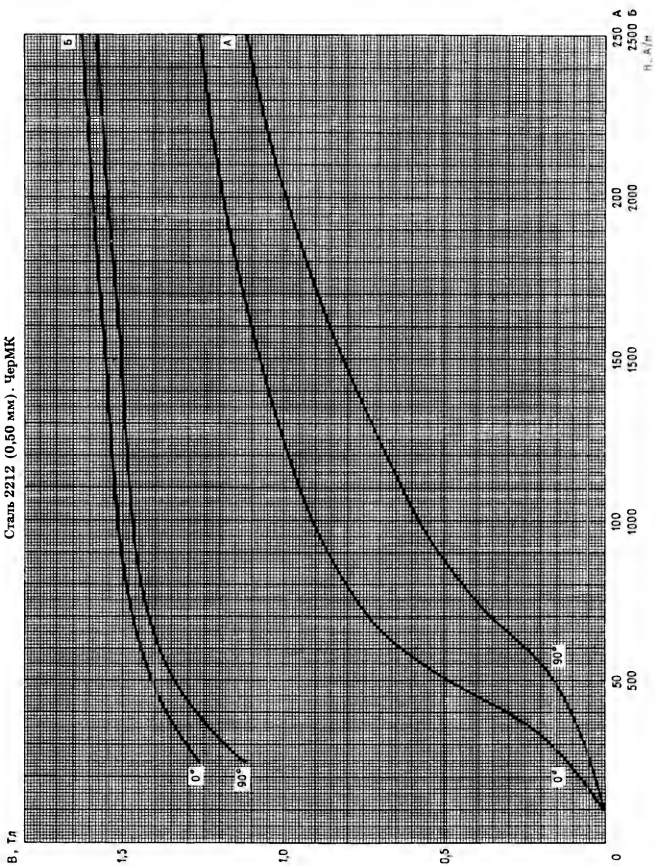
P_{yA} , Вт/кг

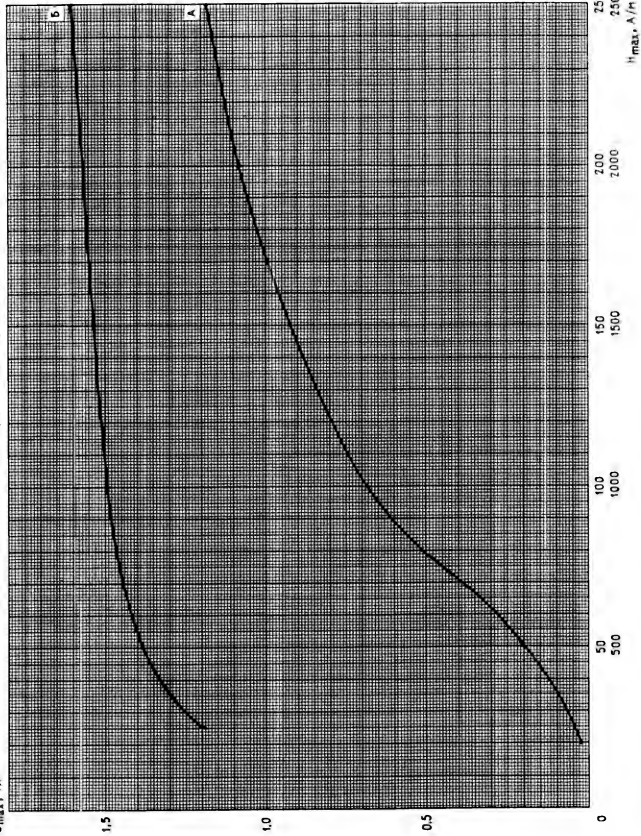
Сталь 2212 (0,50 мм) . ЧерМК



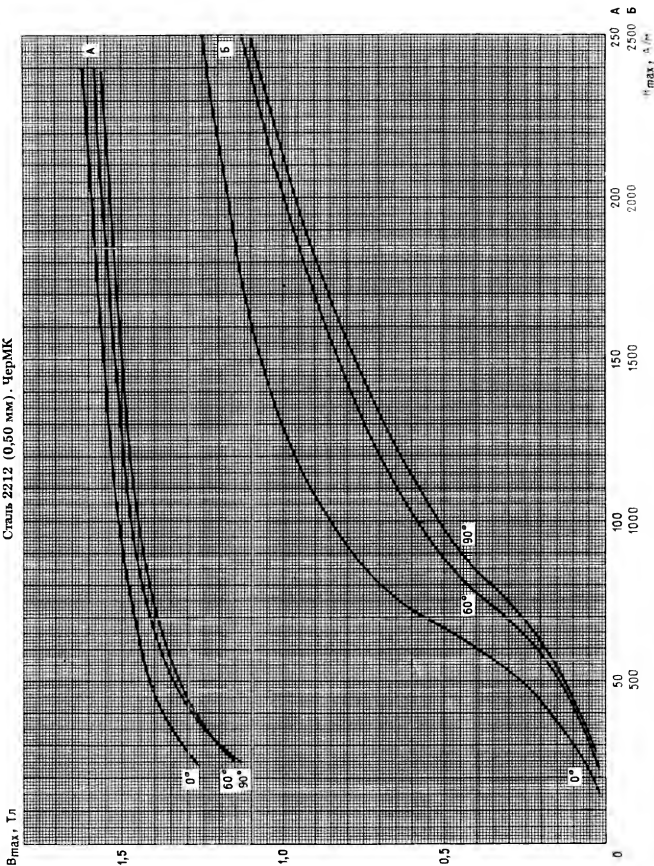
Сталь 2212 (0,50 мм). ЧерМК



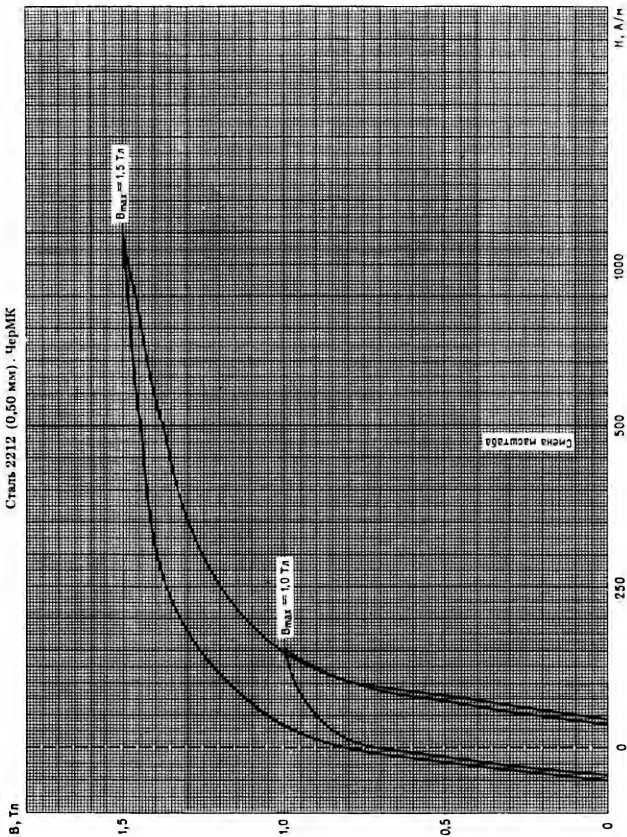




$H_{max}, A/m$

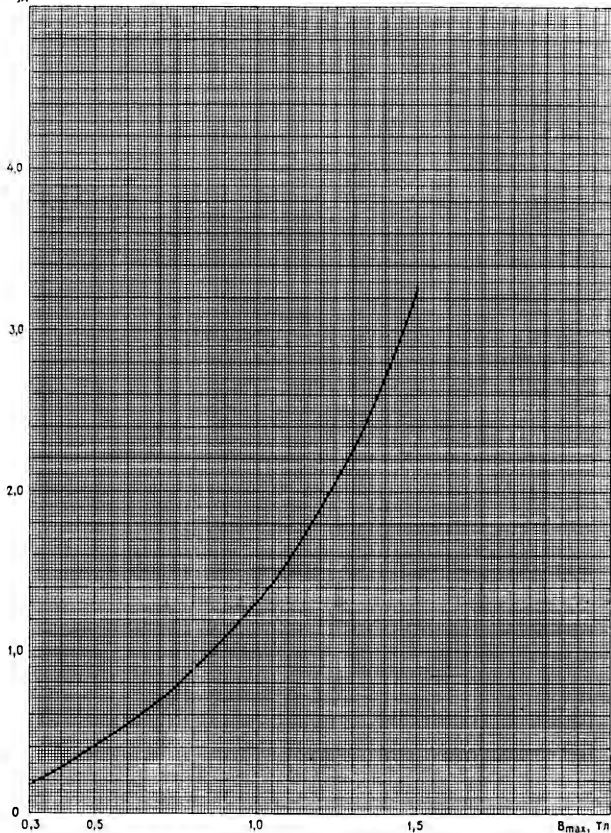


Сталь 2212 (0,50 мм). ЧерМК



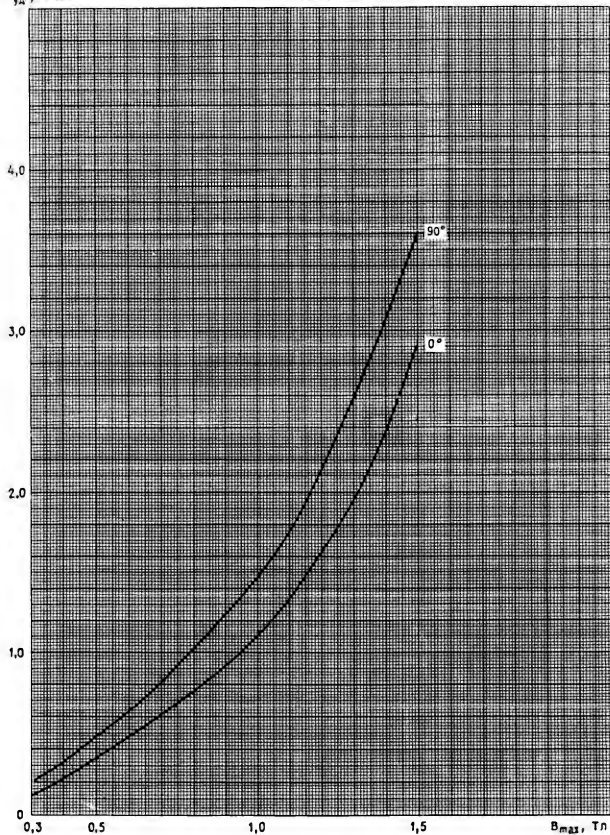
$P_{уд}$, Вт/кг

Сталь 2411 (0,50 мм). ЧерМК

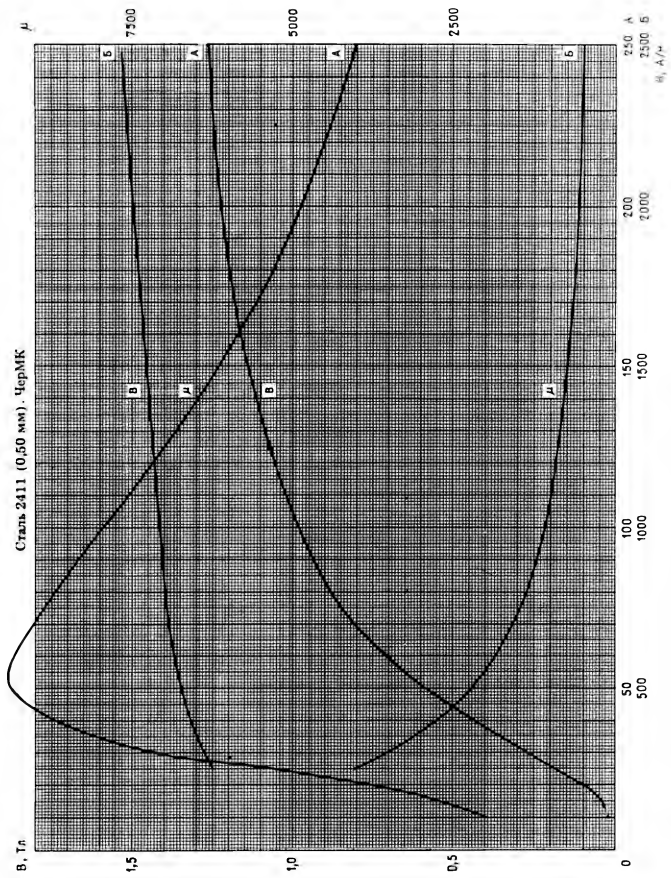


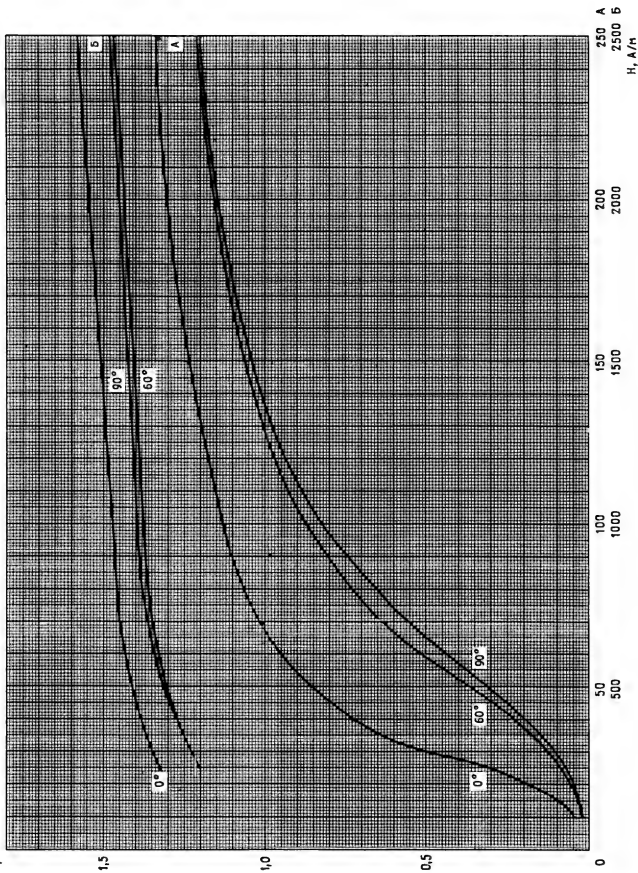
$P_{уд}$, Вт/кг

Сталь 2411 (0,50 мм). ЧерМК



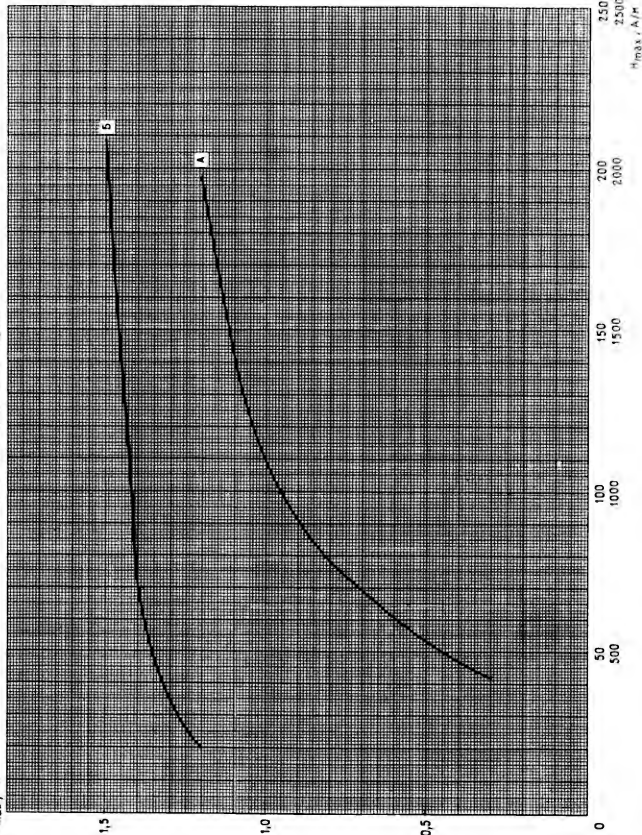
Сталь 2411 (0,50 мм). ЧерМК

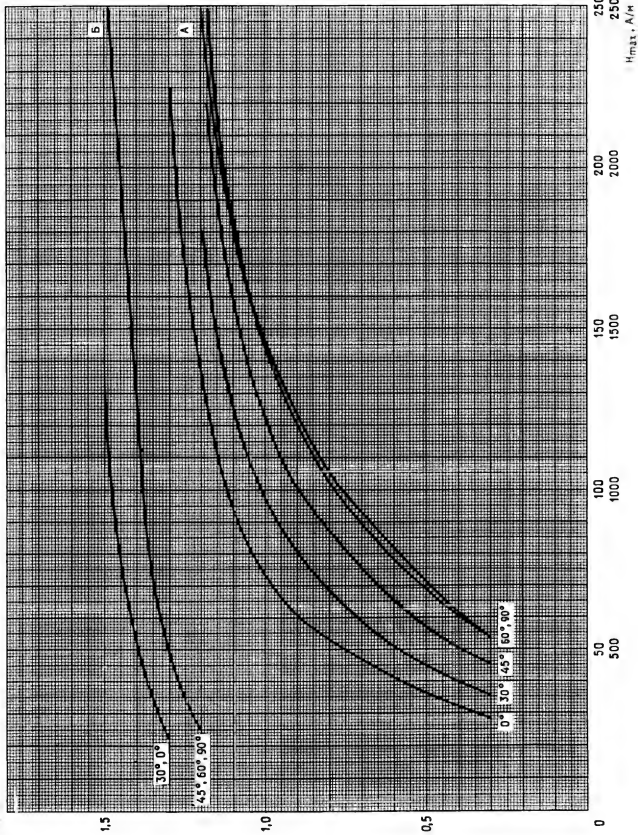




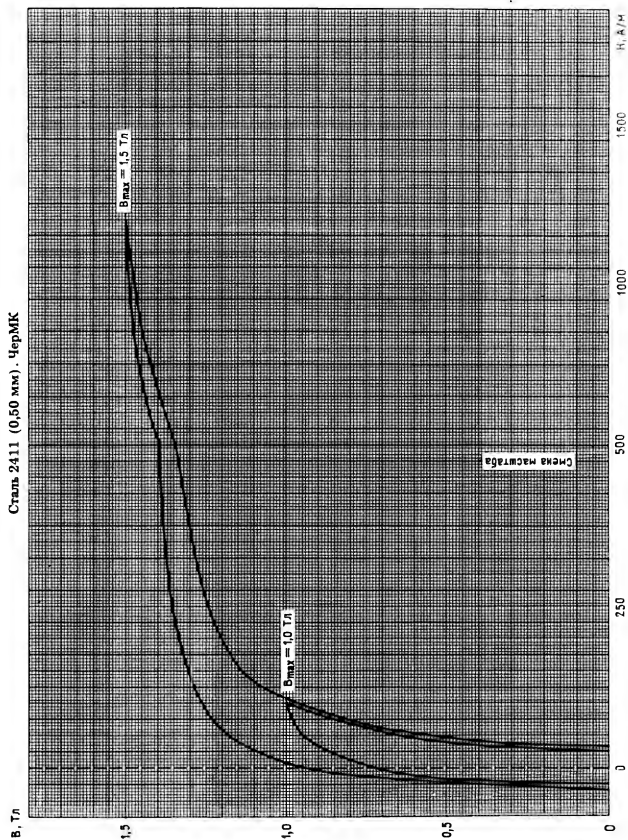
Сталь 2411 (0.50 мм). ЧерМК

$B_{max}, Tл$





Сталь 2411 (0,50 мм). ЧерМК



$B_{уд}, \text{Вт/кг}$

Сталь 2213 (0,50 мм) . ВИЗ

5,0

4,0

3,0

2,0

1,0

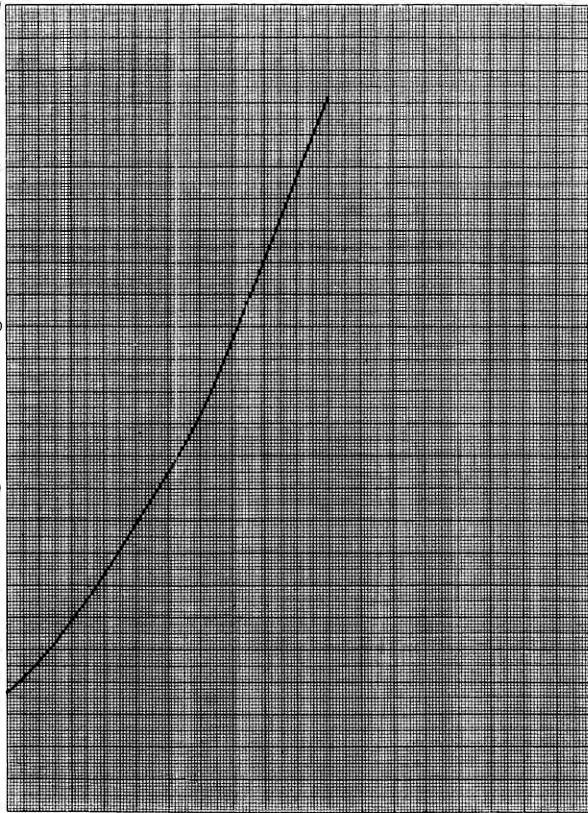
0

0,5

1,0

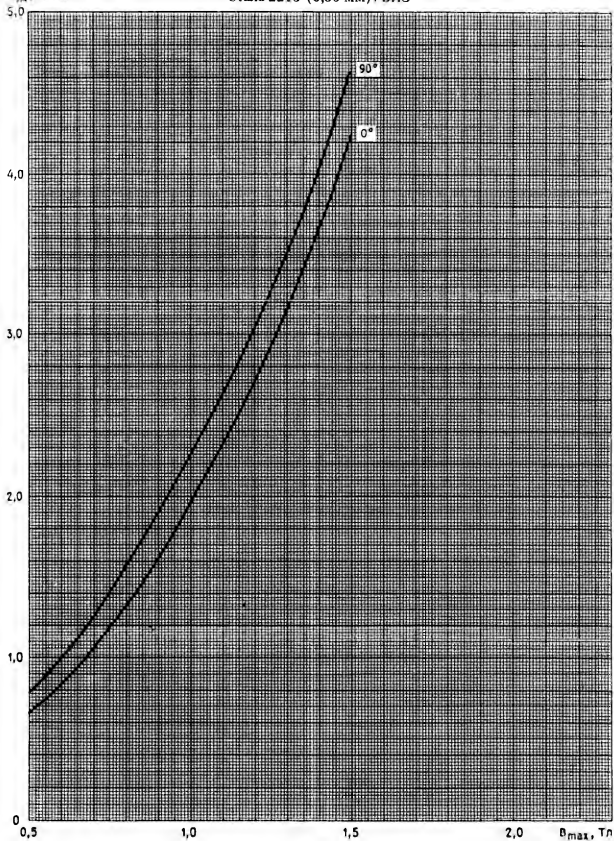
1,5

$B_{max}, \text{Тл}$

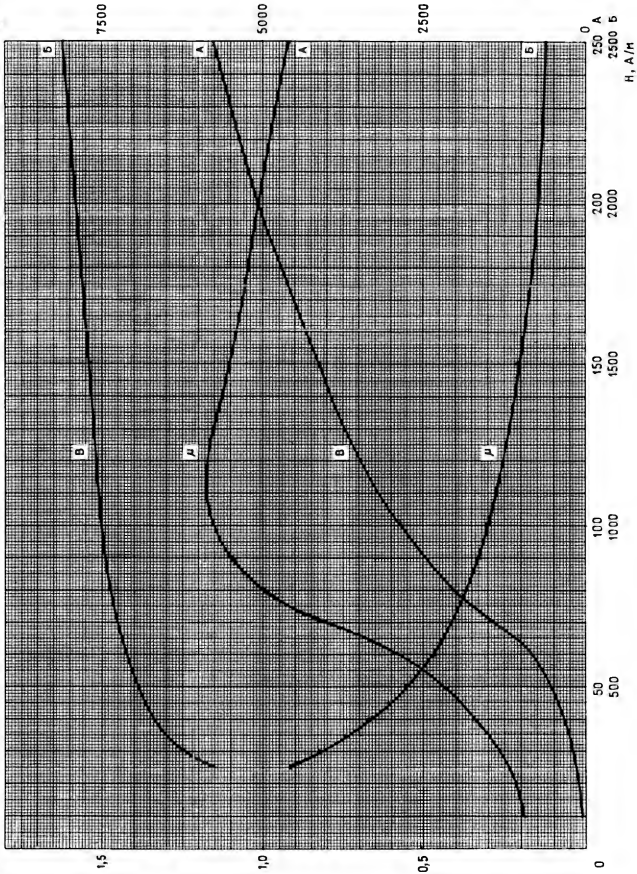


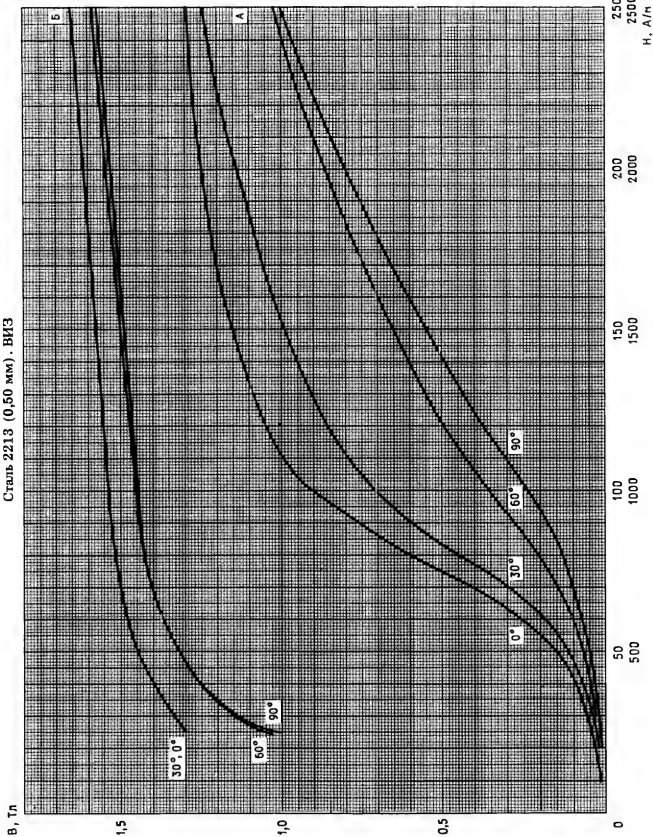
$P_{уд}, \text{Вт/кг}$

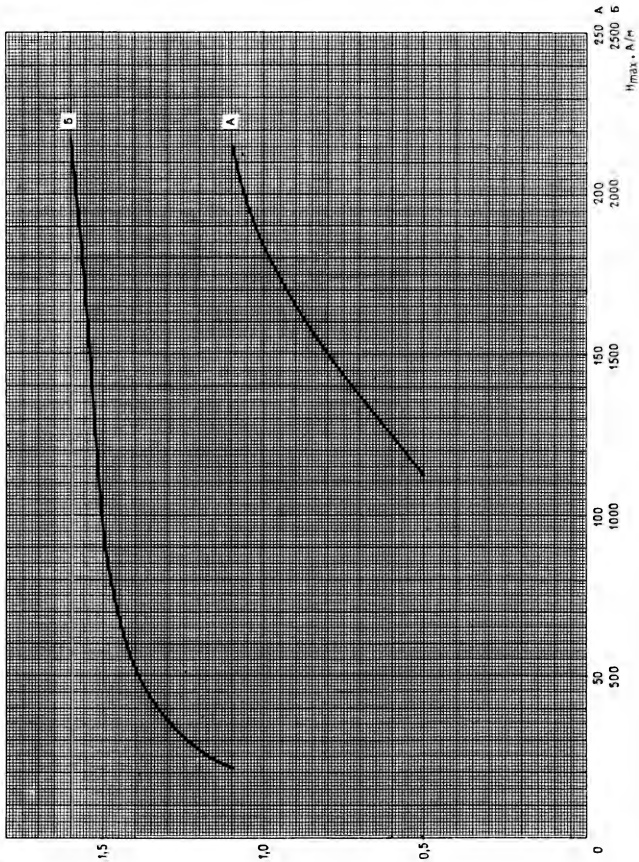
Сталь 2213 (0,50 мм), ВИЗ

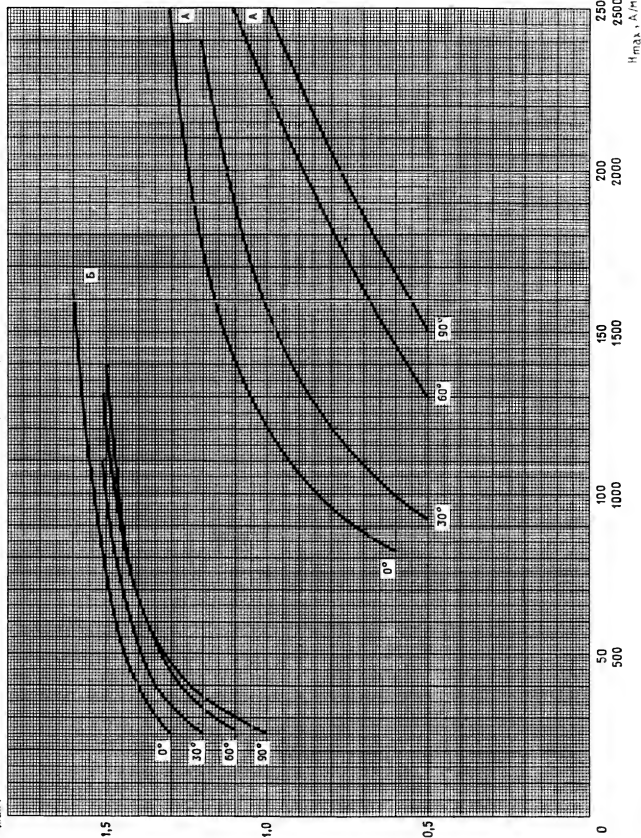


Сталь 2213 (0,50 мм). ВКЗ

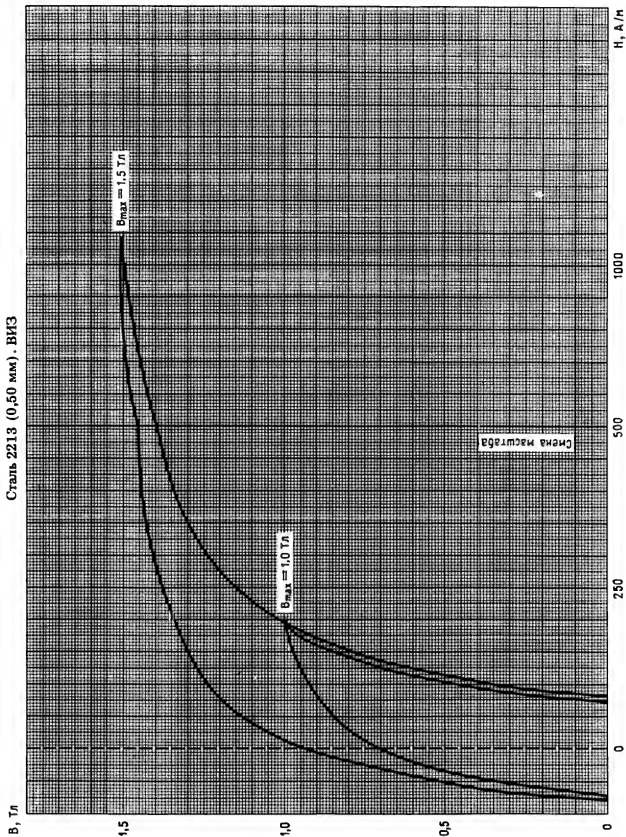






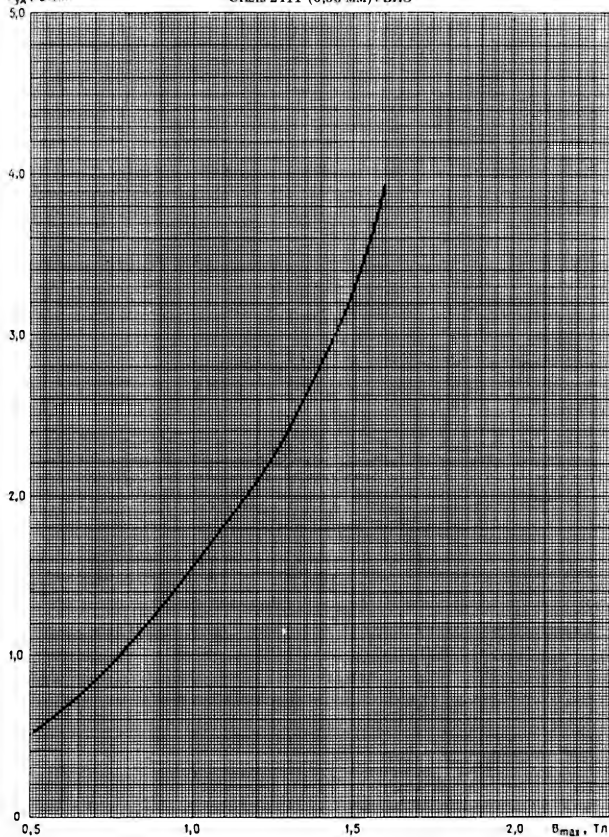


Сталь 2213 (0,50 мм). ВИС



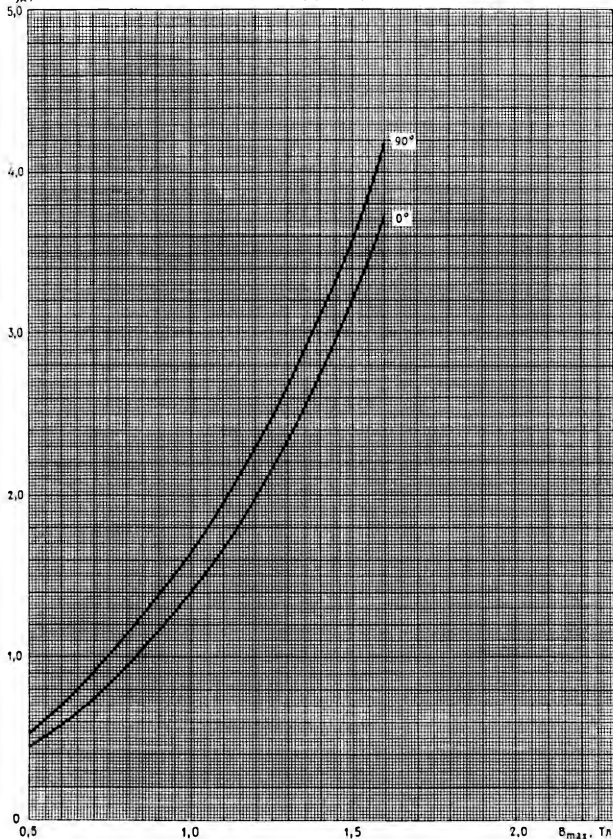
$P_{уд}$, Вт/кг

Сталь 2411 (0,50 мм) - ВИЗ

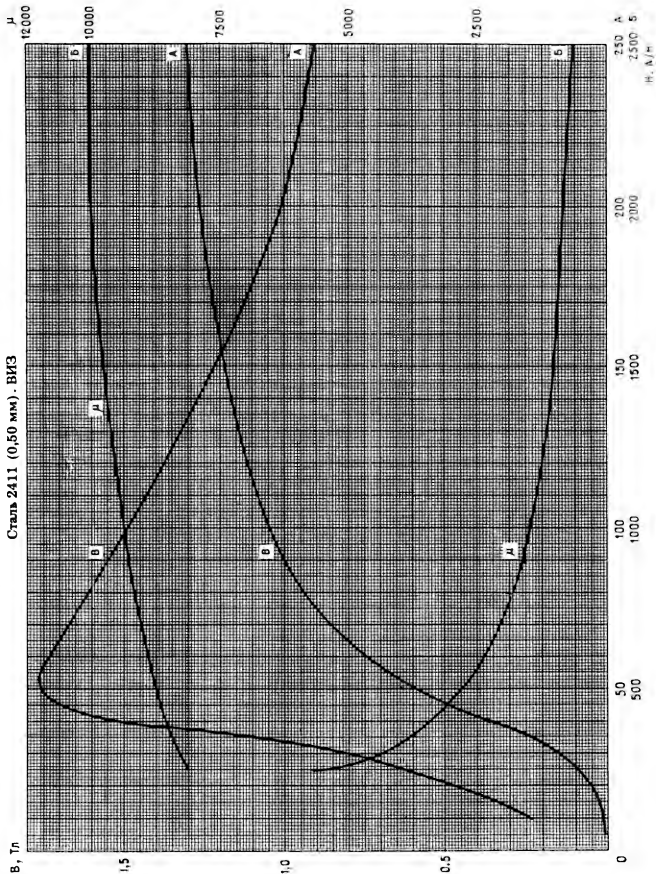


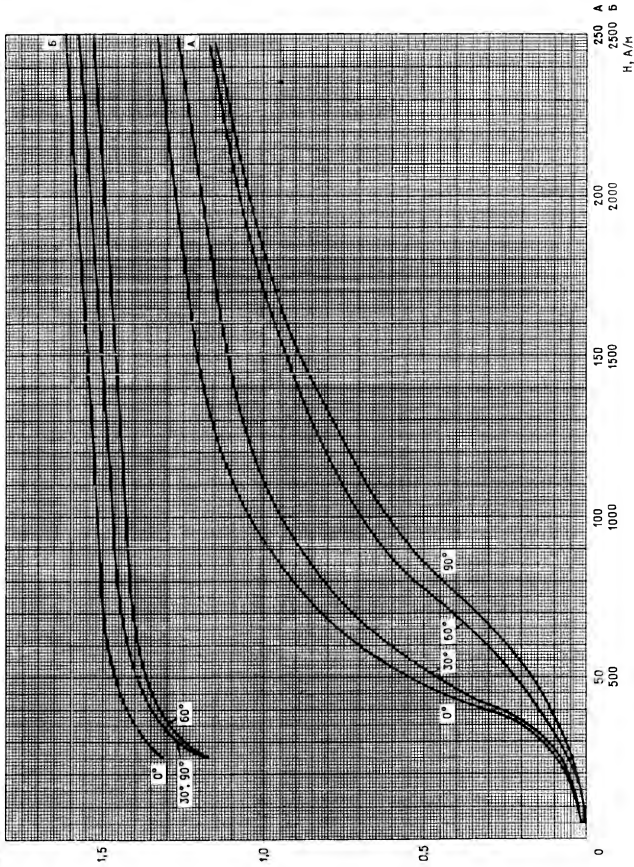
$P_{уд}$, Вт/кг

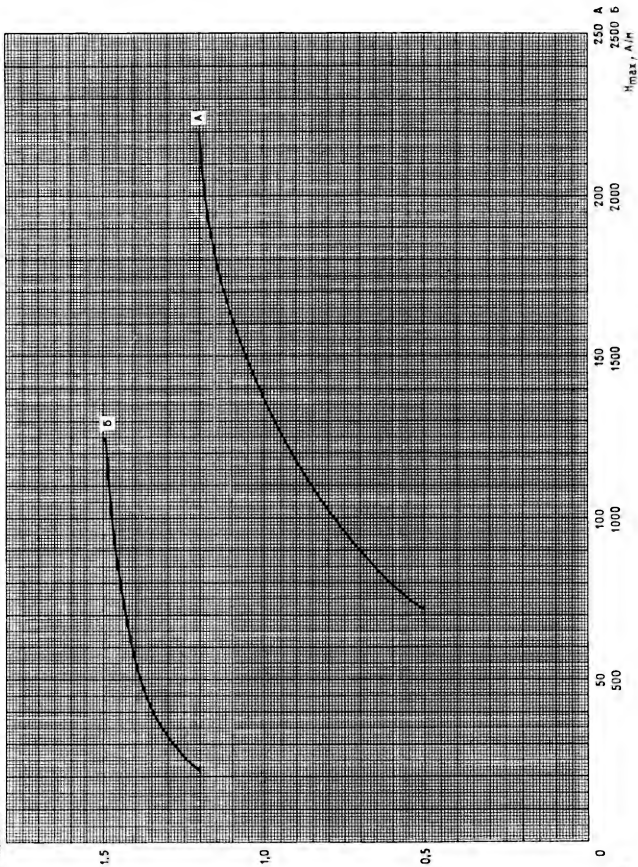
Сталь 2411 (0,50 мм). ВИЗ

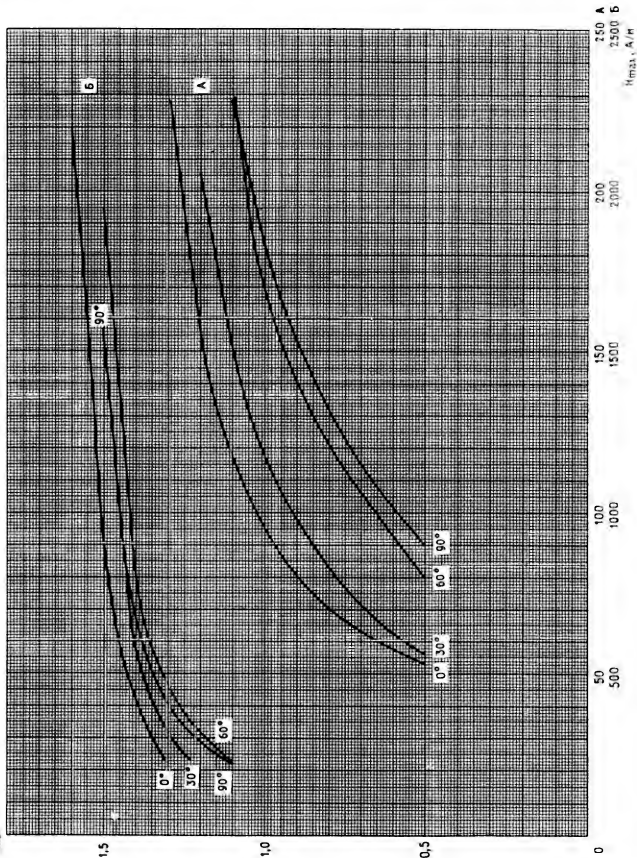


Сталь 2411 (0,50 мм). ВИЗ

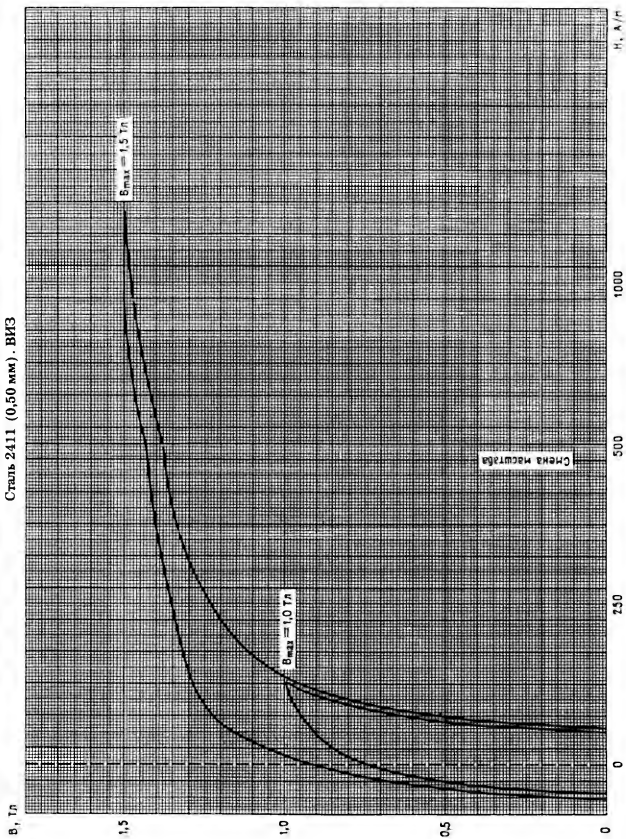






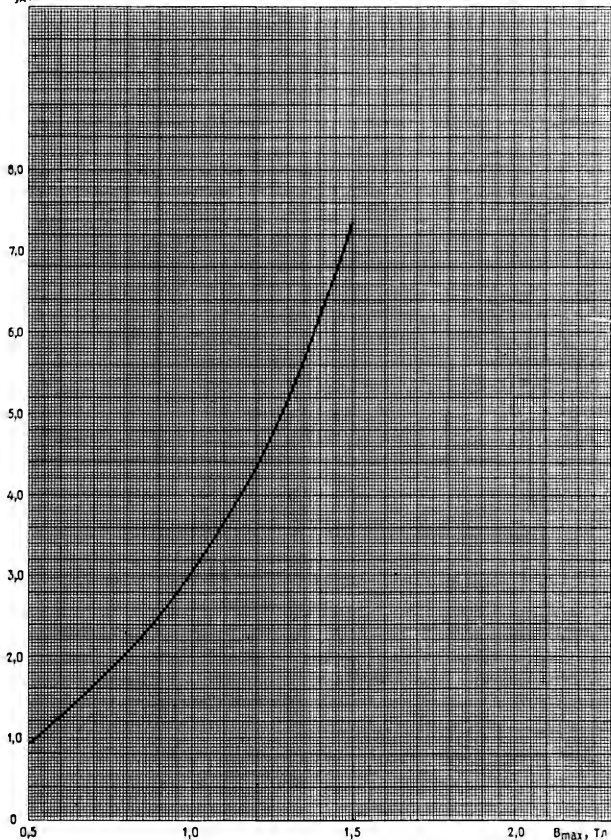


Сталь 2411 (0,50 мм). ВИЗ



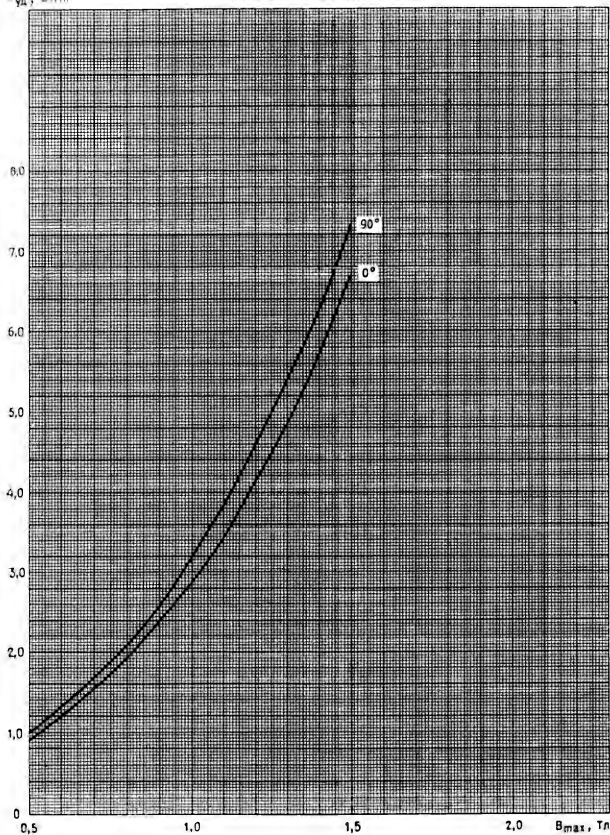
$R_{уд}$, Вт/кг

Сталь 2011 (0,50 мм) . КарМК



$P_{уд}$, Вт/кг

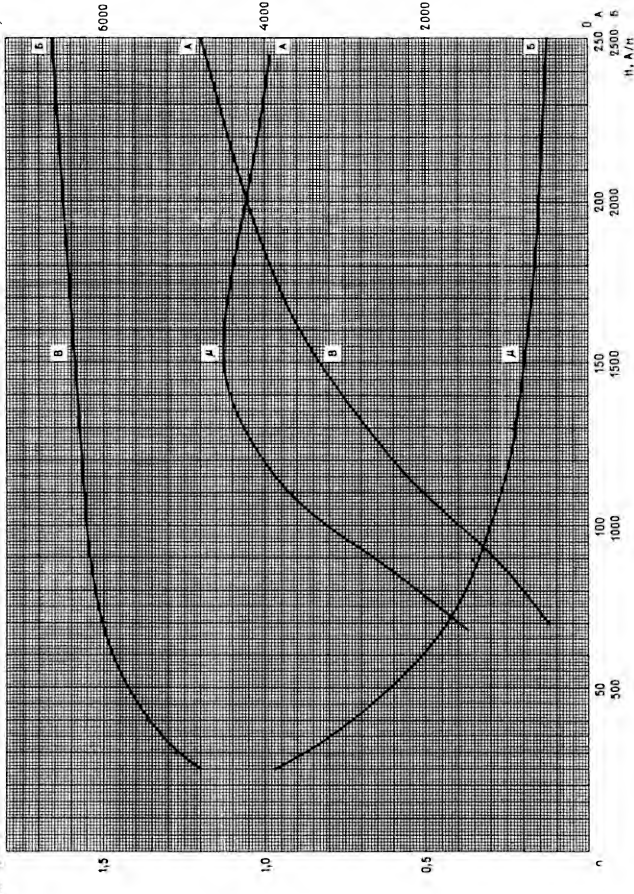
Сталь 2011 (0,50 мм) . КарМК

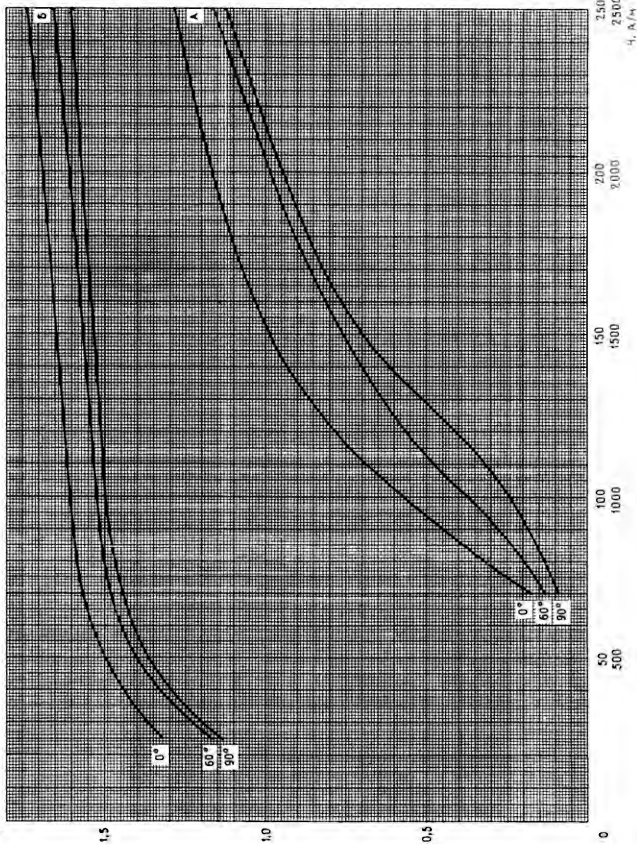


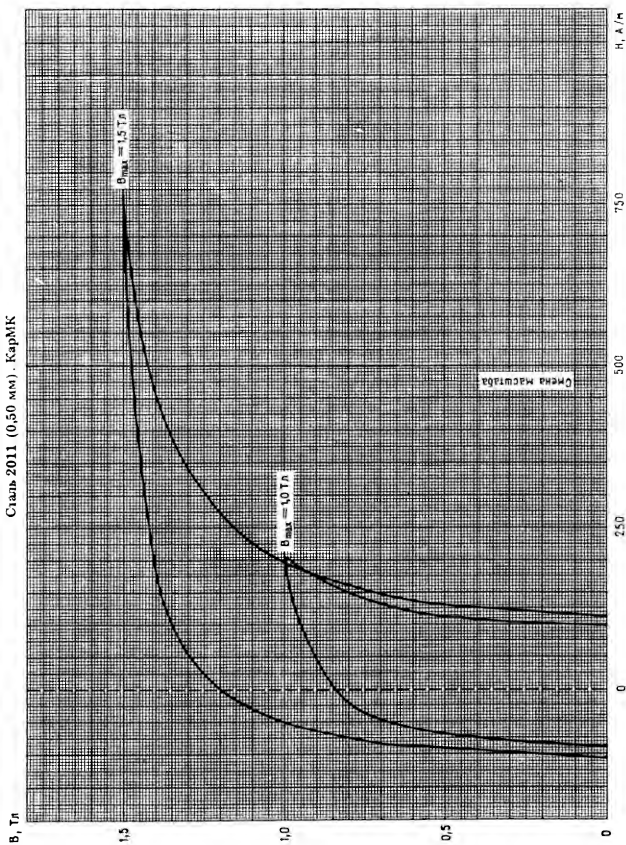
Сталь 2011 (0,50 мм). КарМК

160

μ

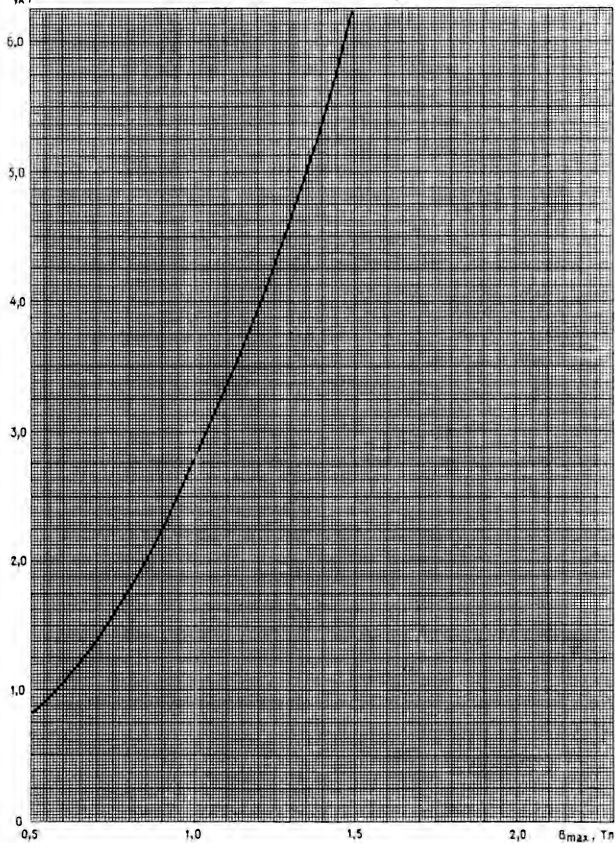






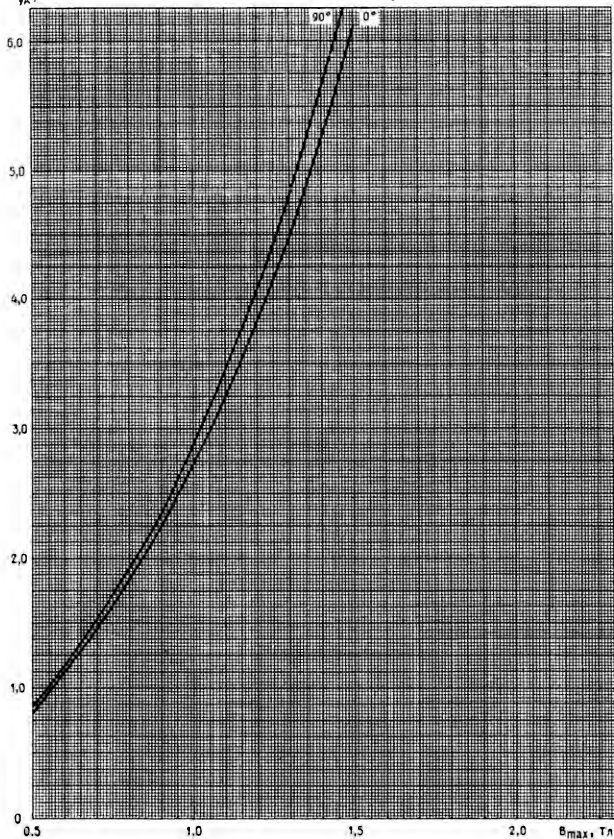
$P_{уд}$, Вт/кг

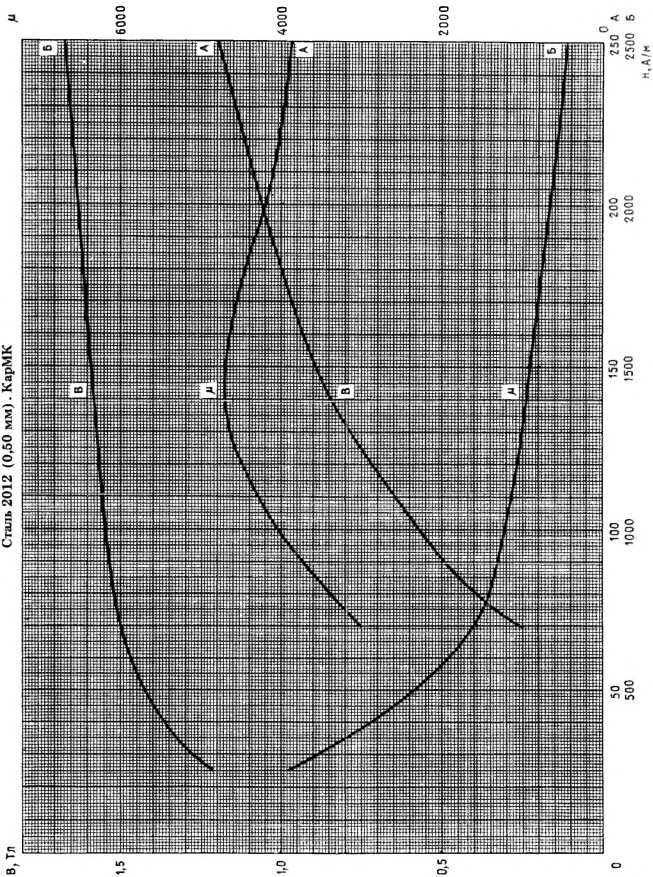
Сталь 2012 (0,50 мм). КарМК

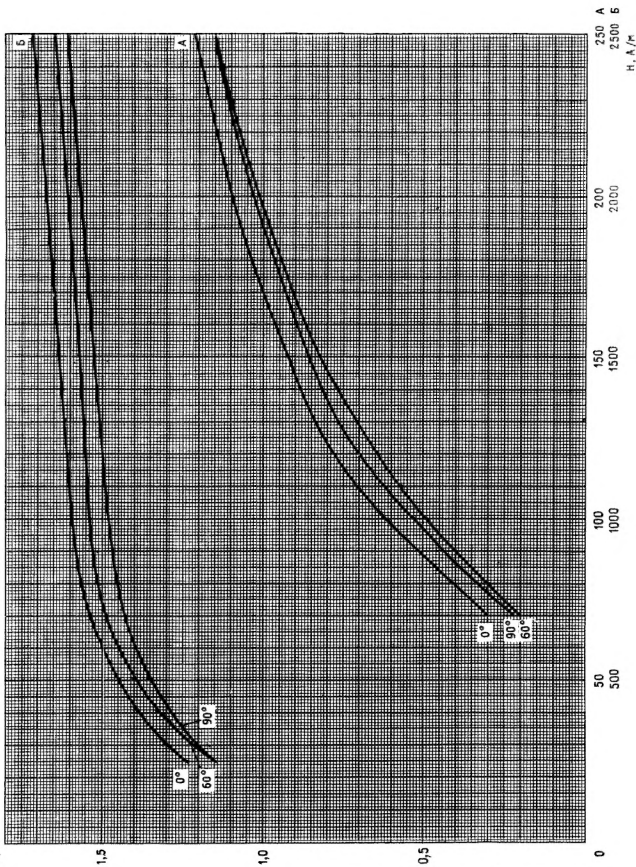


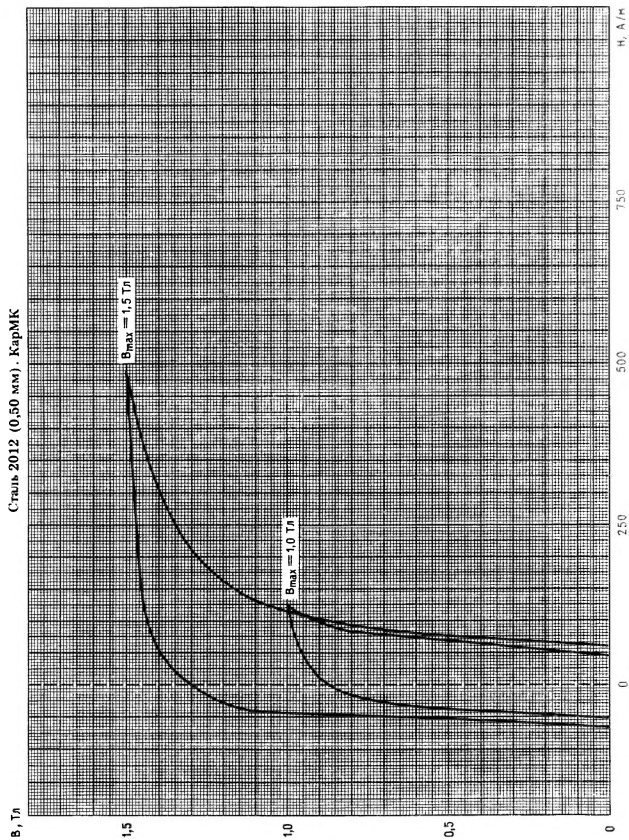
$P_{уд}$, Вт/кг

Сталь 2012 (0,50 мм) . КарМК









СПРАВОЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Борис Владимирович Молотиллов, Леонард Владимирович Миронов, Алексей Григорьевич Петренко, Леонид Петрович Бабичев, Валерий Петрович Барятинский, Владимир Григорьевич Борисенко. Вячеслав Сергеевич Вашпанов, Виктор Владимирович Голубков, Константин Васильевич Иванов, Леонид БеруновИч Казаджан, Жанна Ефимовна Линецкая, Борис БорисовИч Минц, Борис Михайлович Овсянников, Геннадий ВикторовИч Парфенов, Александр Михайлович Поживанов, Феликс АлександровИч Радин, Нелли Петровна Сакир, Валерий Иванович Сидоркин, Михаил БорисовИч Цырлин, Владимир Константинович Чистяков, Иван Васильевич Франценюк, Вера Федоровна Ярошенко

ХОЛОДНОКАТАНЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СТАЛИ

Справочник

Под редакцией *Бориса ВладимировИч Молотилова*

Редактор издательства Л. М. Гордон
Художественный редактор Ю. И. Смурыгин
Технический редактор В. А. Лыкова
Корректор Ю. И. Королева

ИБ № 2845

Сдано в набор 20.01.88 Подписано в печать 02.08.88 Т 11894 Формат бумаги 84X108^{1/16} Бумага книжно-журнальная Гарнитура литературная Печать офсетная Усл печ л. 17,64 Усл кр-отт 18,06 Уч-изд л 19 54 Тираж 3600 экз Заказ № 35 Цена 1 р Изд № 1226

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Металлургия»,
119857, ГСП, Москва Г—34, 2 й Обыденский пер л 14